202308206

(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公開本 (11)公開編號：TW 202308206 A

(43)公開日： 中華民國 112 (2023) 年 02 月 16 日

(21)申請案號：111127628 (22)申請日： 中華民國 111 (2022) 年 07 月 22 日

(51)Int. Cl.： *H01M10/052 (2010.01)* *H01M10/0525 (2010.01)*
H01M10/0565 (2010.01) *H01M4/04 (2006.01)*
H01M4/13 (2010.01) *H01M4/583 (2010.01)*
H01M4/62 (2006.01)

(30)優先權：2021/07/23 美國 17/383,735
2021/07/23 美國 17/383,744
2021/07/23 美國 17/383,756
2021/07/23 美國 17/383,769
2021/07/23 美國 17/383,793
2021/07/23 美國 17/383,803
2021/12/28 美國 17/563,183

(71)申請人：美商萊登股份有限公司 (美國) LYTEN, INC. (US)
美國

(72)發明人：蘭寧 布魯斯 LANNING, BRUCE (US)；史托威爾 麥可 W STOWELL, MICHAEL W. (US)；庫瑪 安紐拉格 KUMAR, ANURAG (IN)；貝爾 傑佛瑞 BELL, JEFFREY (US)；黃前文 HUANG, QIANWEN (CN)；鮑康 傑西 BAUCOM, JESSE (US)；李 游 LI, YOU (US)；索恩 約翰 THORNE, JOHN (CA)；範赫斯頓 卡雷爾 VANHEUSDEN, KAREL (US)；羅戈吉那 艾蓮娜 ROGOJINA, ELENA (US)；加茲達 耶西 GAZDA, JERZY (US)；單 景寧 SHAN, JINGNING (US)

(74)代理人：劉法正；尹重君

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：113 項 圖式數：22 共 115 頁

(54)名稱

由多個碳質區域形成的鋰硫電池陰極

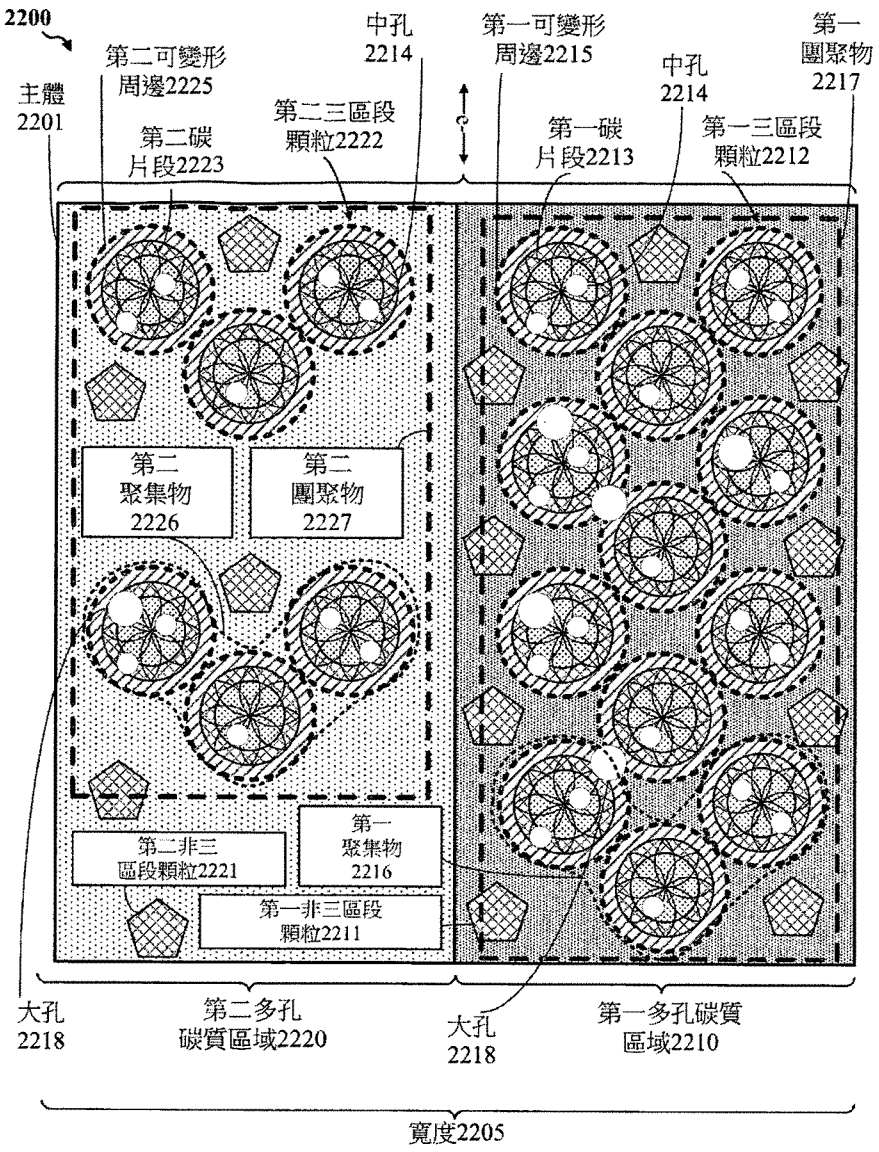
(57)摘要

揭示了一種適合於併入電池電極中之標的組合物。在一些實行方案中，該標的組合物可包括孔隙，該等孔隙可由若干碳質顆粒界定大小或形狀。各顆粒可具有多個區域，使得相鄰區域藉由一些孔隙彼此隔開。可變形區域可分佈於各顆粒之整個周邊，例如，以適應多個相鄰顆粒之聚結。該標的組合物亦可包括複數個聚集物及複數個團聚物，其中各聚集物包括接合在一起之許多顆粒，且各團聚物包括接合在一起之許多聚集物。

A composition of matter suitable for incorporation into a battery electrode is disclosed. In some implementations, the composition of matter may include pores that may be defined in size or shape by several carbonaceous particles. Each of the particles may have multiple regions such that adjacent regions are separated from each other by some of the pores. Deformable regions may be distributed throughout a perimeter of each of the particles, for example, to accommodate coalescence of multiple adjacent particles. The composition of matter may also include a plurality of aggregates and a plurality of agglomerates, where

each aggregate includes a multitude of the particles joined together, and each agglomerate includes a multitude of the aggregates joined together.

指定代表圖：



【圖 22】

符號簡單說明：

2201:主體

2205:寬度

2210:第一多孔碳質區域

2211:第一非三區段顆粒

2212:第一三區段顆粒

2213:第一碳片段

2214:中孔

2215:第一可變形周邊

2216:第一聚集物

2217:第一團聚物

2218:大孔

2220:第二多孔碳質區域

2221:第二非三區段顆粒

2222:第二三區段顆粒

2223:第二碳片段

2225:第二可變形周邊

2226:第二聚集物

2227:第二團聚物

202308206
申請案號：202308206
申請日：
IPC 分類：

【發明摘要】

【中文發明名稱】由多個碳質區域形成的鋰硫電池陰極

【英文發明名稱】LITHIUM-SULFUR BATTERY CATHODE FORMED FROM MULTIPLE CARBONACEOUS REGIONS

【中文】

揭示了一種適合於併入電池電極中之標的組合物。在一些實行方案中，該標的組合物可包括孔隙，該等孔隙可由若干碳質顆粒界定大小或形狀。各顆粒可具有多個區域，使得相鄰區域藉由一些孔隙彼此隔開。可變形區域可分佈於各顆粒之整個周邊，例如，以適應多個相鄰顆粒之聚結。該標的組合物亦可包括複數個聚集物及複數個團聚物，其中各聚集物包括接合在一起之許多顆粒，且各團聚物包括接合在一起之許多聚集物。

【英文】

A composition of matter suitable for incorporation into a battery electrode is disclosed. In some implementations, the composition of matter may include pores that may be defined in size or shape by several carbonaceous particles. Each of the particles may have multiple regions such that adjacent regions are separated from each other by some of the pores. Deformable regions may be distributed throughout a perimeter of each of the particles, for example, to accommodate coalescence of multiple adjacent particles. The composition of matter may also include a plurality of aggregates and a plurality of agglomerates, where each aggregate includes a multitude of the particles joined together, and each agglomerate includes a multitude of the aggregates joined together.

【指定代表圖】圖 22

【代表圖之符號簡單說明】

2201:主體

2205:寬度

2210:第一多孔碳質區域

2211:第一非三區段顆粒

2212:第一三區段顆粒

2213:第一碳片段

2214:中孔

2215:第一可變形周邊

2216:第一聚集物

2217:第一團聚物

2218:大孔

2220:第二多孔碳質區域

2221:第二非三區段顆粒

2222:第二三區段顆粒

2223:第二碳片段

2225:第二可變形周邊

2226:第二聚集物

2227:第二團聚物

【特徵化學式】

無

【發明說明書】

【中文發明名稱】由多個碳質區域形成的鋰硫電池陰極

【英文發明名稱】LITHIUM-SULFUR BATTERY CATHODE FORMED FROM MULTIPLE CARBONACEOUS REGIONS

【技術領域】

【0001】 本揭示案一般而言係關於電池，且更詳言之，係關於可補償操作循環損耗之鋰離子電池。

【先前技術】

【0002】 電池之最新發展允許消費者在許多新應用中使用電子裝置。然而，電池技術需要進一步改良。

【發明內容】

【0003】 提供此[發明內容]以便以簡化形式介紹下文在[實施方式]中進一步描述的一些概念。此[發明內容]不意欲鑑別所主張標的物之關鍵特徵或基本特徵，亦不意欲限制所主張標的物之範疇。

【0004】 本揭示案中描述之標的物的一個創新態樣可經實行為一種包括複數個孔隙之標的組合物。可適用於併入電池電極中的標的組合物包括複數個顆粒，每個顆粒包含第一區段及第二區段，第一區段包括複數個具有均勻孔徑之第一孔隙，第二區段包括複數個第二孔隙。第二區段可相對於第一區段經同心地定位且藉由複數個第一孔隙中之至少一些與第一區段隔開，其中複數個第二孔隙具有沿徑向方向自顆粒中心至顆粒邊界逐漸減小之孔徑。標的組合物亦可包括複數個聚集物，各聚集物包括接合在一起之許多顆粒，以及複數個團聚物，各團聚物包括接合在一起之許多聚集物。

【0005】 在一些實行方案中，各顆粒可具有 20 奈米(nm)與 150 nm 之間的主要尺寸。各聚集物可具有 10 奈米(nm)與 10 微米(μm)之間的主要尺寸。各團聚物

可具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的主要尺寸。至少一些孔隙可分散於一或多個顆粒或聚集物中，其中各孔隙可具有 0 nm 與 100 nm 之間的主要尺寸。

【0006】 在一個實行方案中，各顆粒可包括第一孔隙率區域及與第一孔隙率區域相鄰定位之第二孔隙率區域。第一孔隙率區域可具有第一類型之孔隙且第二孔隙率區域可具有第二類型之孔隙，使得第一孔隙率區域具有與第二孔隙率區域不同的孔隙率。因此，第一類型之孔隙可具有第一孔隙密度，而第二類型之孔隙具有第二孔隙密度。例如，第一孔隙率區域可具有 0.0 立方公分(cc)/g 與 2.0 cc/g 之間的第一孔隙密度，且第二孔隙率區域可具有 1.5 與 5.0 cc/g 之間的第二孔隙密度。在一些態樣中，第二孔隙率區域可至少部分地由第一孔隙率區域封裝。

【0007】 在一些實行方案中，一些孔隙可散佈於整個團聚物中，其中至少一些孔隙具有 1.3 nm 與 32.3 nm 之間的主要尺寸。導電添加劑可分散於至少一些孔隙內。在一些態樣中，標的組合物可具有暴露之碳表面，其具有 10 m^2/g 至 3,000 m^2/g 之間的表面積及/或 10 m^2/g 至 3,000 m^2/g 之間的複合表面積(例如，包括微觀限定於孔隙內之硫)。在一個實行方案中，標的組合物可在 12,000 鎊/平方吋(psi)之壓力下具有 100 S/m 至 20,000 S/m 之間的電導率。在一個實行方案中，顆粒、聚集物及/或團聚物可包括可有助於硫成核的暴露碳表面，使得標的組合物具有大約 1:5 至 10:1 之間的硫與碳重量比。在一些態樣中，一些團聚物用一或多種基於聚合物之黏合劑彼此連接。

【0008】 本揭示案中描述之標的物的另一個創新態樣可經實行為一種電池。在一些實行方案中，電池可包括陽極；安置在陽極之一或多個暴露表面之上的聚合物網路；與陽極相對定位之陰極；至少部分地分散於整個陰極中且與陽極接觸之電解質，該電解質經組態以在陰極與陽極之間傳輸複數個鹼金屬離子；以及隔板。在一些實行方案中，陽極可包括在電池之操作放電-充電循環期間可釋

放鹼金屬離子之鹼金屬。聚合物網路可包括用彼此交聯之氟化聚合物鏈接枝之碳質材料。氟化聚合物鏈可響應於電池之操作循環而產生含鹼金屬之氟化物。在一個實行方案中，含鹼金屬之氟化物的形成可抑制自陽極之鹼金屬枝晶形成，例如，使得鋰被消耗以形成氟化鋰而非形成含鋰枝晶結構。電解質可至少部分地分散於整個陰極中且與陽極接觸，且可有助於鹼性離子在陰極與陽極之間的傳輸。隔板可定位在陽極與陰極之間。

【0009】 在一個實行方案中，碳質材料可包括平坦石墨烯、起皺石墨烯、碳奈米管(CNT)及/或碳奈米洋蔥(CNO)。氟化聚合物鏈可包括單體，包括丙烯酸2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7-十二氟庚酯(DFHA)、甲基丙烯酸3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-十七氟癸酯(HDFDMA)、甲基丙烯酸2,2,3,3,4,4,5,5-八氟戊酯(OFPMA)、甲基丙烯酸四氟丙酯(TFPM)、3-[3,3,3-三氟-2-羥基-2-(三氟甲基)丙基]雙環[2.2.1]庚-2-基甲基丙烯酸酯(HFA 單體)、或基於乙烯基之單體(包括 2,3,4,5,6-五氟苯乙烯(PFSt))。聚合物網路可具有大約 0.001 μm 與 5 μm 之間的厚度。

【0010】 在一些態樣中，氟化聚合物鏈可接枝至碳質材料之表面，使得接枝可基於自由基引發劑，該等自由基引發劑包括過氧化苯甲醯(BPO)或偶氮二異丁腈(AIBN)中之至少一種。氟化聚合物鏈可經由伍茲反應(Wurtz reaction)與鹼金屬離子發生化學反應，該伍茲反應可與鹼金屬氟化物之產生相關。石墨烯奈米片可分散在整個聚合物網路中，其中石墨烯奈米片在聚合物網路內彼此隔離。石墨烯奈米片之分散可包括(石墨烯奈米片的)不同濃度水準。在一些態樣中，石墨烯奈米片之分散可包括用至少一些氟化聚合物鏈來官能化之碳質材料。

【0011】 在一個實行方案中，聚合物網路包括大約 0.001 重量%至 2 重量%之間的氟化聚合物鏈。在一些態樣中，聚合物網路包括與陽極接觸之界面相層及安置在界面相層頂部之保護層。界面相層可基於陽極與聚合物網路之間的界面處

之伍茲反應。在一些方面中，交聯之聚合物網路可包括大約 5 重量%至 100 重量%之間的用氟化聚合物鏈接枝之碳質材料且其餘為氟化聚合物、非氟化聚合物、或可交聯單體、或其組合。在一個實行方案中，用氟化聚合物鏈接枝之碳質材料可包括 5 重量%至 50 重量%之氟化聚合物鏈且其餘為碳質材料。

【0012】 在一些態樣中，聚合物網路可進一步界定與界面相層及/或保護層之自我修復性質相關的密度梯度，且可加強聚合物網路，其可抑制自陽極之枝晶生長。在一個實行方案中，陽極可為鹼金屬層及/或包括暴露於電解質之表面，其中各暴露表面可包括含鹼金屬奈米結構或微結構。在一些態樣中，含鹼金屬奈米結構或微結構可包括碳質顆粒、多個各自包括碳質顆粒之聚集物、或多個各自包括若干聚集物之團聚物。

【0013】 在一個實行方案中，各碳質顆粒包括具有第一孔隙密度之第一孔隙率區域及具有第二孔隙密度之第二孔隙率區域。第二孔隙率區域可至少部分地由第一孔隙率區域封裝，且第二密度可小於第一密度。在一些態樣中，第二孔隙率區域可至少暫時地微觀限定元素硫，其可與電池之操作放電-充電循環相關。

【0014】 在一些實行方案中，陽極可在結構上由三維(3D)支架及/或結構界定，該支架及/或結構可包括可至少嵌入鹼金屬的相鄰石墨烯片。例如，陽極可形成為具有相鄰石墨烯片之晶格，該等石墨烯片具有用於鹼金屬電沉積及/或嵌入之暴露表面。在一個實行方案中，膜可安置在陰極上且包括具有相互化學鍵結之三官能環氧化合物及二胺寡聚物化合物的晶格。該膜可與在電池之操作放電-充電循環期間產生的含鹼金屬之多硫化物中間物鍵結，且補充經安置在陽極上之聚合物鞘。

【0015】 本揭示案中描述之標的物的另一個創新態樣可經實行為一種包括陽極、與陽極相對定位之陰極、安置在陰極上之保護鞘、電解質及隔板的電池。聚合物網路可安置在陽極上且可包括用複數個氟化聚合物鏈接枝之碳質材料，

該複數個氟化聚合物鏈經交聯成晶格。在一些態樣中，晶格可響應於電池之操作循環而產生鹼金屬氟化物。鹼金屬氟化物可經組態以抑制自陽極之鹼金屬枝晶形成。另外，陽極可在電池之操作循環期間輸出鹼金屬離子。安置在陰極上之保護鞘可包括三官能環氧化合物及基於二胺寡聚物之化合物，該二者可彼此發生化學反應。電解質可分散在整個陰極中且與陽極接觸。隔板可定位在陽極與陰極之間。

【0016】 在一些實行方案中，聚合物網路可沉積在陽極之一或多個暴露表面之上。碳質材料可包括平坦石墨烯、起皺石墨烯、複數個碳奈米管(CNT)或複數個碳奈米洋蔥(CNO)中之一或多者。氟化聚合物鏈可包括複數種單體，一或多種單體包括丙烯酸 2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7-十二氟庚酯(DFHA)、甲基丙烯酸3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-十七氟癸酯(HDFDMA)、甲基丙烯酸2,2,3,3,4,4,5,5-八氟戊酯(OFPMA)、甲基丙烯酸四氟丙酯(TFPM)、3-[3,3,3-三氟-2-羥基-2-(三氟甲基)丙基]雙環[2.2.1]庚-2-基甲基丙烯酸酯(HFA 單體)、或基於乙烯基之單體(包括 2,3,4,5,6-五氟苯乙烯(PFSt))。聚合物網路可具有大約 0.001 μm 與 5 μm 之間的厚度。氟化聚合物鏈可接枝至碳質材料中之相應一者的表面上。

【0017】 在各個實行方案中，氟化聚合物鏈可經由伍茲反應與陽極之鹼金屬之一或多個表面發生化學相互作用。在一些態樣中，碳質材料可包括分散在整個聚合物網路中之石墨烯奈米片。石墨烯奈米片可在聚合物網路內彼此隔離。複數個石墨烯奈米片在整個聚合物網路中之分散可具有不同濃度水準。石墨烯奈米片可用氟化聚合物鏈官能化。

【0018】 在一些實行方案中，聚合物網路包括大約 0.001 重量%至 2 重量%之間的氟化聚合物鏈。在一個實行方案中，聚合物網路可包括與陽極接觸之界面相區域及安置在界面相區域頂部之保護區域。界面相區域可基於陽極與聚合物網路之間的界面處之伍茲反應。界面相層可包括複數種可交聯單體中之一或多

者，該等單體包括甲基丙烯酸酯(MA)、丙烯酸酯、乙烯基官能基及/或環氧官能基與胺官能基之組合。保護區域可藉由密度梯度表征，該密度梯度可與保護區域之自我修復性質相關。密度梯度可加強聚合物網路。以此方式，聚合物網路可抑制自陽極之枝晶生長。

【0019】 在各個實行方案中，陽極可包括暴露表面，其中各暴露表面具有含鹼金屬奈米結構及/或微結構，該等結構各自可包括碳質材料。在一個實行方案中，陽極可具有三維(3D)結構，其中一些相鄰石墨烯片可嵌入鹼金屬離子。

【0020】本揭示案中描述之標的物之另一個創新態樣可經實行為一種包括陽極、陰極、安置在陰極上之保護鞘、隔板及電解液之電池。陽極可以晶格組態佈置且包括碳質材料。陰極可與陽極相對定位。隔板可安置在陽極與陰極之間。安置在陰極上之保護鞘可包括三官能環氧化合物及基於二胺寡聚物之化合物，該二者可彼此發生化學反應。以此方式，保護鞘可基於保護鞘與一或多種含鋰多硫化物中間物之間的化學結合來防止電池內的多硫化物遷移。電解質可分散於陰極內且接觸陽極。

【0021】在一個實行方案中，聚合物網路可沉積在陽極之一或多個暴露表面之上。聚合物網路可具有與碳質材料接枝且彼此交聯之氟化聚合物鏈。以此方式，聚合物網路可保持含鹼金屬之氟化物，其反過來可抑制與陽極相關的鹼金屬枝晶形成。

【0022】在各個實行方案中，裂縫可延伸至陰極中，其中保護鞘可分散在整個一或多個裂縫中。以此方式，保護鞘可經佈置以降低陰極對破裂之敏感性。在一個實行方案中，保護鞘具有基於三官能環氧化合物及基於二胺寡聚物之化合物的交聯三維結構。在一些實例中，三官能環氧化合物為三羥甲基丙烷三縮水甘油醚(TMPTE)、參(4-羥苯基)甲烷三縮水甘油醚、或參(2,3-環氧丙基)異氰脲酸酯中之一或多種，且基於二胺寡聚物之化合物為二醯肼亞碸(DHSO)或

JEFFAMINE® D-230 聚醚胺中之一或多種。另外或替代地，保護鞘可包括三羥甲基丙烷參[聚(丙二醇)及胺封端之醚。

【0023】在一些實行方案中，碳質材料可包括平坦石墨烯、起皺石墨烯、複數個碳奈米管(CNT)及/或複數個碳奈米洋蔥(CNO)。在一個實行方案中，陰極可包括主結構，該主結構具有平坦石墨烯、起皺石墨烯、碳奈米管(CNT)或碳奈米洋蔥(CNO)中之一或多者，其中陽極包括固體鋰金屬層。

【0024】在一個實行方案中，氟化錫層可安置在陽極上，且氟化鋰層可形成在氟化錫層與陽極之間。氟化鋰層可與氟離子與鋰離子之間的化學反應相關。以此方式，氟化鋰層可抑制自陽極之含鋰枝晶生長。在一些態樣中，固體電解質界面相可安置在陽極上。固體電解質界面相可包括錫、錳、鉬、氟化合物、氟化錫、氟化錳、氮化矽、氮化鋰、硝酸鋰、磷酸鋰、氧化錳及/或氧化鋰鑭鋯(LLZO)。

【0025】本揭示案中描述之標的物的另一個創新態樣可經實行為一種電池。在各個實行方案中，電池可包括經組態以在電池循環期間輸出複數個鋰離子之陽極、安置在陽極上之分級層、與陽極相對定位之陰極、分散在整個陰極及陽極中之電解質、及定位於陽極與陰極之間的隔板。在一些實行方案中，分級層可包括聚合物網路，該聚合物網路包括由與石墨烯奈米片相關的起皺石墨烯形成之密度梯度，該等石墨烯奈米片分散於整個聚合物網路中且在聚合物網路內彼此隔離，至少一些起皺石墨烯經組態以沿一或多個撓曲點在體積上膨脹且保持電池之循環期間產生的多硫化物。在一些情況下，聚合物網路可包括接枝至至少一些起皺石墨烯之一或多個撓曲點上的複數個氟化聚(甲基)丙烯酸酯；聚合物網路內的複數個碳-氟(C-F)鍵，該複數個碳-氟(C-F)鍵中之至少一些經組態以藉由伍茲反應與複數個鋰離子中之至少一些發生化學反應，且藉由置換氟離子(F^-)而轉化成碳-鋰(C-Li)鍵；在伍茲反應期間的氟離子(F^-)置換過程中形成之複數個碳-碳(C-C)鍵，碳-碳(C-C)鍵之形成與聚合物網路之交聯相關；及響應於氟離子

(F^-)置換而形成之氟化鋰(LiF)，氟化鋰(LiF)與複數個鋰離子中之至少一些的消耗相關。

【0026】在一些情況下，電池亦可包括在電池之循環期間暴露於電解質之陽極之表面處形成的固體電解質界面相。在其他情況下，分級層可經組態以在電池之循環期間生長固體電解質界面相。在一些方面中，分級層可藉由原子層沉積(ALD)、化學氣相沉積(CVD)、或物理氣相沉積(PVD)中之一或多者沉積於陽極上。

【0027】本揭示案中描述之標的物的另一個創新態樣可經實行為一種電池。在各個實行方案中，電池可包括經組態以在電池循環期間輸出複數個鋰離子之陽極、安置在陽極上之分級層、與陽極相對定位之陰極、分散在整個陰極及陽極中之電解質、及定位於陽極與陰極之間的隔板。在一些實行方案中，分級層可包括聚合物網路，該聚合物網路包括由與石墨烯奈米片相關的起皺石墨烯形成之密度梯度，該等石墨烯奈米片分散於整個聚合物網路中且在聚合物網路內彼此隔離，至少一些起皺石墨烯經組態以沿一或多個撓曲點在體積上膨脹且保持電池之循環期間產生的多硫化物。在一些情況下，聚合物網路可包括接枝至至少一些起皺石墨烯之一或多個撓曲點上的複數個氟化聚(甲基)丙烯酸酯；聚合物網路內的複數個碳-氟(C-F)鍵，該複數個碳-氟(C-F)鍵中之至少一些經組態以與複數個鋰離子中之至少一些發生化學反應，且藉由置換氟離子(F^-)而轉化成碳-鋰(C-Li)鍵；在伍茲反應期間的氟離子(F-)置換過程中形成之複數個碳-碳(C-C)鍵；及響應於複數個碳-碳(C-C)鍵中之至少一些的形成而形成之氟化鋰(LiF)，其中氟化鋰(LiF)可與複數個鋰離子中之至少一些的消耗相關。

【0028】在一些態樣中，第一複數個中孔具有第一中孔密度，且第二複數個中孔具有不同於第一中孔密度之第二中孔密度。在其他態樣中，第一複數個大孔具有第一孔隙密度，且第二複數個大孔具有不同於第一孔隙密度之第二孔隙密

度。在一些其他態樣中，第一多孔碳質區域或第二多孔碳質區域中之一或多者可經組態以使硫成核。

【0029】 在一些實行方案中，陰極包含複數個孔隙，且可包括複數個非三區段顆粒；複數個三區段顆粒；複數個聚集物，各聚集物包括接合在一起之許多三區段顆粒；複數個中孔，其散佈在整個複數個聚集物中；複數個團聚物，各團聚物包括彼此接合之許多聚集物；及複數個大孔，其散佈在整個複數個聚集物中。在一些情況下，各三區段顆粒可包括彼此交織在一起且藉由中孔彼此隔開之複數個碳片段、及經組態以與一或多個相鄰非三區段顆粒或三區段顆粒聚結之可變形周邊。在一些態樣中，各聚集物可具有 10 奈米(nm)與 10 微米(μm)之間的範圍內之主要尺寸，各中孔可具有 3.3 奈米(nm)與 19.3 nm 之間的主要尺寸，各團聚物可具有在 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的近似範圍內之主要尺寸，且各大孔可具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的主要尺寸。

【0030】 在一些情況下，第一多孔碳質區域或第二多孔碳質區域中之一或多者亦可包括選擇性滲透殼，該選擇性滲透殼經組態以分別在第一多孔碳質區域或第二多孔碳質區域上形成分離的液相。在一些態樣中，第一多孔碳質區域在 12,000 鎊/平方吋(psi)之壓力下具有 500 S/m 至 20,000 S/m 之間的近似範圍內之電導率。在其他態樣中，第二多孔碳質區域在 12,000 鎊/平方吋(psi)之壓力下具有 0 S/m 至 500 S/m 之間的近似範圍內之電導率。在一些其他態樣中，第一複數個團聚物或第二複數個團聚物中之一或多者可包括用一或多種基於聚合物之黏合劑彼此連接之聚集物。

【0031】 在一些實行方案中，各三區段顆粒可包括圍繞各三區段顆粒之中心定位的第一孔隙率區域，該第一孔隙率區域包括第一孔隙；及包圍第一孔隙率區域的第二孔隙率區域，該第二孔隙率區域包括第二孔隙。在一些情況下，第一孔隙界定第一孔隙密度，且第二孔隙界定不同於第一孔隙密度的第二孔隙密

度。在其他實行方案中，陰極亦可包括一或多個額外多孔碳質區域，至少一個額外多孔碳質區域與第二多孔碳質區域耦合。在一些情況下，一或多個額外多孔碳質區域在遠離第一多孔碳質區域之方向上、以碳質材料之濃度水準逐步降低之次序佈置。

【0032】 本揭示案中描述之標的物的另一個創新態樣可經實行為一種包括複數個孔隙之標的組合物。在各個實行方案中，標的組合物可包括複數個非三區段顆粒；複數個聚集物，各聚集物包括接合在一起之許多三區段顆粒，各聚集物具有在 10 奈米(nm)與 10 微米(μm)之間的範圍內之主要尺寸；散佈於整個複數個聚集物中之複數個中孔，各中孔具有 3.3 奈米(nm)與 19.3 nm 之間的主要尺寸；複數個團聚物，各團聚物包括彼此接合之許多聚集物，各團聚物具有在 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的近似範圍內之主要尺寸；及散佈於整個複數個聚集物中之複數個大孔，各大孔具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的主要尺寸。在一些實行方案中，各三區段顆粒可包括彼此交織在一起且藉由中孔彼此隔開之複數個碳片段、及經組態以與一或多個相鄰非三區段顆粒或三區段顆粒聚結之可變形周邊。在一些態樣中，各孔隙具有在 0 奈米(nm)與 32.3 nm 之間的近似範圍內之主要尺寸。在其他態樣中，標的組合物在 12,000 鎊/平方吋(psi)之壓力下具有 100 S/m 至 20,000 S/m 之間的近似範圍內之電導率。

【0033】 在各個實行方案中，標的組合物亦可包括選擇性滲透殼，該選擇性滲透殼經組態以在標的組合物之一或多個暴露表面上形成分離的液相。在其他實行方案中，標的組合物亦可包括分散在標的組合物內之電解質。在一些情況下，至少一些團聚物用一或多種基於聚合物之黏合劑彼此連接。

【0034】 本揭示案所描述之標的物之一或多個實行方案之細節在隨附圖式及以下實施方式中列出。其他特徵、態樣、及優點自實施方式、圖式、及申請專利範圍變得顯而易知。注意以下圖式之相對尺寸可不按比例繪製。

【圖式簡單說明】

【0035】

圖 1 展示描繪根據一些實行方案之示例性電池的圖。

圖 2 展示描繪根據一些實行方案之另一示例性電池的圖。

圖 3 展示根據一些實行方案之電池之示例性電極的圖。

圖 4 展示根據一些實行方案之包括保護性晶格之示例性電池的一部分的圖。

圖 5 展示根據一些實行方案之包括氟化錫(SnF_2)層之陽極結構的圖。

圖 6 展示根據一些實行方案之圖 5 的陽極結構之放大部分的圖。

圖 7 展示根據一些實行方案之電池之聚合物網路的圖。

圖 8A 展示根據一些實行方案之具有分級孔隙率之示例性碳質顆粒的圖。

圖 8B 展示根據一些實行方案之三區段顆粒之實例的圖。

圖 8C 展示代表根據一些實行方案之圖 8B 之三區段顆粒的示例性階梯函數。

圖 8D 展示描繪根據一些實行方案之示例性碳質顆粒之孔隙體積與孔隙寬度關係之示例性分佈的圖表。

圖 9A 及 9B 展示根據一些實行方案之圖 8A 及/或圖 8B 描繪之示例性碳質顆粒、聚集物、及/或團聚物的電子顯微照片。

圖 10A 及 10B 展示根據一些實行方案之用二氧化碳(CO_2)處理之碳質顆粒的透射電子顯微鏡(TEM)影像。

圖 11 展示描繪在根據一些實行方案之本揭示案之陽極及/或陰極中佔優勢的碳孔隙率類型的圖。

圖 12 展示描繪根據一些實行方案之電池之陽極或陰極中分散的微孔及中孔之累計孔隙體積與孔隙寬度的圖表。

圖 13 展示描繪根據一些實行方案之按照循環數之電池性能的圖表。

圖 14 展示描繪根據一些實行方案之按照循環數之容量的條形圖。

圖 15 展示描繪根據一些實行方案之按照循環數之電池性能的圖表。

圖 16 展示描繪根據一些實行方案之按照循環數之電池放電容量的圖表。

圖 17 展示描繪根據一些實行方案之按照循環數之電池放電容量的圖表。

圖 18 展示描繪根據一些實行方案之各種含有 TBT 之電解質混合物的電池比放電容量的圖表。

圖 19 展示描繪根據一些實行方案之圖 1 的電池之按照循環數之電池比放電容量的圖表。

圖 20 展示描繪根據其他實行方案之圖 2 的電池之按照循環數之電池比放電容量及放電容量保持能力的圖表。

圖 21 展示描繪根據一些其他實行方案之圖 2 的電池之按照循環數之電池比放電容量及放電容量保持能力的圖表。

圖 22 展示根據一些實行方案之電池之示例性陰極的圖。

在各個圖式中，相同參考數字及名稱指示相同元件。

【實施方式】

相關申請案之交互參照

【0036】 本專利申請案主張 2021 年 12 月 28 日提交之標題為“LITHIUM-SULFUR BATTERY CATHODE FORMED FROM MULTIPLE CARBONACEOUS REGIONS”之美國專利申請案第 17/563,183 號之優先權，該美國專利申請案係主張 2021 年 7 月 23 日提交之標題為“CARBONACEOUS MATERIALS FOR LITHIUM-SULFUR BATTERIES”之美國專利申請案第 17/383,803 號之優先權的部分延續申請案，全部轉讓予本申請案之受讓人。本專利申請亦主張 2021 年 7 月 23 日提交之標題為“POWDERED MATERIALS INCLUDING CARBONACEOUS STRUCTURES FOR LITHIUM-SULFUR BATTERY CATHODES”之美國專利申請案第 17/383,735 號、2021 年 7 月 23 日提

交之標題為“PROTECTIVE POLYMERIC LATTICES FOR LITHIUM ANODES IN LITHIUM-SULFUR BATTERIES”之美國專利申請案第 17/383,744 號、2021 年 7 月 23 日提交之標題為“BATTERY INCLUDING MULTIPLE PROTECTIVE LAYERS”之美國專利申請案第 17/383,756 號、2021 年 7 月 23 日提交之標題為“CARBON-SCAFFOLDED LITHIUM-SULFUR BATTERY CATHODES FEATURING A POLYMERIC PROTECTIVE LAYER”之美國專利申請案第 17/383,769 號、及 2021 年 7 月 23 日提交之標題為“PROTECTIVE LAYER INCLUDING TIN FLUORIDE DISPOSED ON A LITHIUM ANODE IN A LITHIUM-SULFUR BATTERY”之美國專利申請案第 17/383,793 號之優先權，全部轉讓予本申請案之受讓人。先前申請案之揭示內容被視為本專利申請案之部分且各自以全文引用方式併入本專利申請案中。

【0037】 以下描述係關於出於描述本揭示案之創新態樣之目的之一些示例性實行方案。然而，普通熟習此項技術者容易認識到本文中之教示可以許多不同方式應用。所描述實行方案可在任何類型之電化電池、電池、或電池組中實行，且可用於彌補各種性能相關缺點。因此，所揭示實行方案不受本文提供之實例限制，而是涵蓋由隨附請求項涵蓋之所有實行方案。另外，本揭示案之熟知要素將不予以詳細描述或將予以省略，以不混淆本揭示案之相關細節。

【0038】 電池通常包括可彼此連接以便為各種各樣的裝置(諸如(但不限於)行動電話、膝上型電腦、電動車(EV)、工廠、及建築物)提供電力的多個電化電池。某些類型之電池，諸如鋰離子或鋰硫電池，可由於所用電解質之類型或不受控制的電池副反應而導致在性能上受到限制。因此，電解質之優化可改良相應電池之可循環性、比放電容量、放電容量保持能力、安全、及壽命。例如，在未使用的或「新鮮」電池中，鋰離子在活化後以及稍後在初始及後續放電循環期間自由地自陽極傳輸至陰極。然後，在電池充電循環期間，可迫使鋰離子自其

在陰極中之電化學有利位置遷移回到陽極，在陽極處將該等離子儲存供以後使用。與可再充電電池相關之此循環放電-充電過程可導致產生不當化學物質，該等物質可在電池之相應放電及充電期間干擾鋰離子來回陰極之傳輸。具體而言，當鋰離子與存在於陰極中之元素硫(或，在一些組態中，硫化鋰，Li_2S)相互作用時，產生含鋰多硫化物中間物質(在本文中稱為「多硫化物」)。此等多硫化物可溶於電解質中且因此在操作循環期間，在整個電池中擴散，由此導致活性材料自陰極中損失。產生過量濃度水準之多硫化物可在操作循環期間導致不當電池容量衰減及電池故障，從而潛在地減少電動車(EV)之可行駛里程且增加此類 EV 需要再充電之頻率。

【0039】 在一些情況下，多硫化物參與在電池中提供之固體電解質界面相(SEI)中之無機層形成。在一個實例中，陽極可藉由在電解質中形成且含有 0.020 M Li_2S_5(0.10 M 硫)及 5.0 重量% $LiNO_3$ 之穩定無機層來保護。具有氟化鋰及多硫化物(LiF-Li_2S_x)之陽極可使 SEI 富化且在 Li-Cu 半電池之 233 個循環之後，產生 95%穩定庫侖效率，同時防止形成鋰枝晶或可自陽極延伸至陰極且導致電池故障或破裂的其他不受控制之鋰生長。然而，當多硫化物以某些濃度(諸如大於 0.50 M 硫)產生時，SEI 之形成可受阻礙。因此，來自陽極之鋰金屬可不期望地被蝕刻，產生暴露於電解質之粗糙及不完美表面。由於相對高濃度之多硫化物而導致的陽極之此不當劣化(蝕刻)可指示多硫化物溶解及擴散可能限制電池性能。

【0040】 在一些實行方案中，可調整碳質陰極之孔隙率，以在使能量密度最大化與抑制多硫化物遷移至及/或遍及電池電解質中之間達成所需平衡。如本文所用，碳質可係指含有一或多種類型或組態之碳或由其形成的材料。例如，與在習知鋰離子電池電極中相比，陰極孔隙率可在硫及碳複合物陰極中更高。具有相對低孔隙率之更緻密電極可使電解質攝入、寄生重量、及成本最小化。硫利用可受到多硫化物之溶解度及彼等多硫化物至硫化鋰(Li_2S)之轉化率的限

制。多硫化物至硫化鋰之轉化率可基於陰極之可接近表面積。本揭示案之態樣認識到可基於電解質組成材料調整陰極孔隙率以最大化電池體積能量密度。另外或替代地，可將一或多個保護層或區域添加至陰極及/或陽極之暴露於電解質之表面以調整陰極孔隙率水平。在一些態樣中，此等保護層或區域可抑制多硫化物在整個電池中之不當遷移。

【0041】 本文揭示之標的物之各種態樣係關於一種包括液相電解質之鋰硫電池，該電解質可包括三元溶劑套裝及一或多種添加劑。在一些實行方案中，鋰硫電池可包括陰極、與陰極相對定位之陽極、及電解質。陰極可包括多個區域，其中各區域可藉由彼此相鄰及接觸之兩個或兩個以上碳質結構來界定。在一些情況下，電解質可散佈在整個陰極中且與陽極接觸。在一些態樣中，電解質可包括三元溶劑套裝及 4,4'-硫代雙苯硫酚(TBT)。在其他情況下，電解質可包括三元溶劑套裝及 2-巯基苯并噻唑(MBT)。

【0042】 在各個實行方案中，三元溶劑套裝可包括 1,2-二甲氧基乙烷(DME)、1,3-二氧戊環(DOL)、四乙二醇二甲醚(TEGDME)及一或多種添加劑，其可包括硝酸鋰($LiNO_3$)，全部可處於液相中。在一些實行方案中，可藉由將大約 5,800 微升(μL) DME、2,900 微升(μL) DOL 及 1,300 微升(μL) TEGDME 彼此混合以產生混合物來製備三元溶劑套裝。可將大約 0.01 mol 雙(三氟甲烷磺醯基)亞胺鋰(LiTFSI)溶解於三元溶劑套裝中，以在體積比為 2:1:1 之 DME:DOL:TEGDME 中產生 1 M LiTFSI 之近似稀釋水準，包括大約 2 重量百分比(wt.%)硝酸鋰。在其他實行方案中，可用 2,000 微升(μL) DME、8,000 微升(μL) DOL 及 2,000 微升(μL) TEGDME 製備三元溶劑套裝，且可包括大約 0.01 mol 溶解之雙(三氟甲烷磺醯基)亞胺鋰(LiTFSI）。在一些態樣中，可在 DME:DOL:TEGDME 之混合物中以 1 莫耳濃度(M) LiTFSI 之第一近似稀釋水準製備三元溶劑套裝。在其他情況下，可在 1:4:1 之近似體積比之 DME:DOL:TEGDME 中以大約 1 M LiTFSI 之第二近似

稀釋水準製備三元溶劑套裝，且可包括添加 5 M TBT 溶液或添加 5M MBT 溶液，或添加其他添加劑及/或化學物質。

【0043】 在各個實行方案中，各碳質結構可包括相對高密度外殼區域及相對低密度核心區域。在一些態樣中，核心區域可在外殼區域之內部部分內形成。外殼區域可具有在大約 1.0 克每立方公分(g/cc)與 3.5 g/cc 之間的碳密度。核心區域可具有在大約 0.0 g/cc 與 1.0 g/cc 之間或低於第一碳密度之一些其他範圍內的碳密度。在其他實行方案中，各碳質結構可包括具有相同或類似密度之外殼區域及核心區域，例如，以使得碳質結構不包括分級孔隙率。

【0044】 陰極之各種區域可包括彼此互連以形成自外殼區域延伸至核心區域之多孔網路的微孔通道、中孔通道、及大孔通道。例如，在一些態樣中，多孔網路可包括各自具有大約 1.5 nm 之主要尺寸的孔隙。

【0045】 在一些實行方案中，多孔網路之一或多個部分可暫時微觀限定陰極內之電活性材料，諸如(但不限於)元素硫，其可藉由與鋰離子複合來增加電池比容量。在一些態樣中，三元溶劑套裝可具有可調極性、可調溶解度，且能夠傳輸鋰離子。另外，在電池之充電-放電循環期間，三元溶劑套裝可至少暫時懸浮多硫化物(PS)。

【0046】 可實行本揭示案所描述之標的物之特定實行方案以實現一或多個潛在優勢。在一些實行方案中，藉由陰極內微孔、中孔、及大孔通道之互連來形成之多孔網路可包括具有許多不同孔徑的複數個孔隙。在一些實行方案中，複數個孔隙可包括具有小於大約 2 nm 之孔徑的微孔，可包括具有大約 5 與 50 nm 之間的孔徑的中孔，且可包括具有大於大約 50 nm 之孔徑的大孔。微孔、中孔、及大孔可共同地減輕多硫化物不當遷移或擴散至整個電解質中。由於多硫化物穿梭效應可導致活性材料自陰極中損失，因此減輕或減少多硫化物穿梭效應之能力可增加電池性能。

【0047】 在一個實行方案中，微孔可具有經選擇以微觀限定預負載至陰極中之元素硫(S_8，或硫之更小鏈/片段，例如呈 S_2、S_4 或 S_6 形式)的大約 1.5 nm 之孔徑。元素硫在陰極內之微觀限定可允許在電池循環期間產生之 TBT 或 MBT 錯合物抑制長鏈多硫化物在陰極之中孔內遷移。此等長鏈多硫化物在陰極之中孔內積聚可導致陰極在體積上膨脹以保持多硫化物且由此減少多硫化物穿梭效應。因此，鋰離子可繼續經由電解質在陽極與陰極之間自由地傳輸而不被多硫化物阻擋或阻礙。在無多硫化物干擾之情況下，鋰離子在整個電解質中之自由移動可增加電池性能。

【0048】 另外地或替代地，一或多個保護層、鞘、膜、及/或區域(在本文中統稱為「保護層」)可安置在陽極及/或陰極及/或隔板上且與電解質接觸。保護層可包括能夠與多硫化物結合以阻礙多硫化物遷移且防止鋰枝晶形成的材料。在一些態樣中，保護層可以不同組態來佈置且與本文揭示之任何電解質化學物質及/或組合物一起使用，進而可產生電池之完全可調性。

【0049】 在一個實行方案中，碳質材料可用氟化聚合物鏈接枝且沉積在陽極之一或多個暴露表面上。氟化聚合物鏈可經由伍茲反應來交聯成與來自陽極表面之鋰金屬接觸之聚合物網路。交聯聚合物網路形成可繼而抑制與陽極相關之鋰金屬枝晶形成，且亦可產生氟化鋰。聚合物網路內之氟化聚合物可參與電池操作循環期間之化學反應以產生氟化鋰。氟化鋰之形成可涉及來自電解質之鋰離子與氟離子之化學結合。

【0050】 另外地或替代地，聚合物網路可與本文揭示之任何電解質化學物質及/或組合物及/或安置於陰極上之保護鞘組合。在一個實行方案中，保護鞘可藉由將含有二官能或更高官能度環氧之化合物與胺或醯胺化合物組合來形成。該等化合物之分子間交聯導致形成 3D 網路，其對於電解質中之溶解具有高化學抗性。組合物，例如，可包括三官能環氧化合物及基於二胺寡聚物之化合物，該

等化合物可彼此反應以產生保護性晶格，該保護性晶格可結合至在陰極中產生之多硫化物且防止其遷移或擴散至電解質中。另外，保護性晶格可透過可由於電池循環而在陰極中形成之一或多個裂縫擴散。保護性晶格當在陰極中形成之此類裂縫中擴散時，可增加陰極之結構完整性，且減少陰極的與體積膨脹相關之潛在破裂。

【0051】 在各個實行方案中，所揭示電池部件中之一或多者可與安置在暴露於電解質之陽極之邊緣或表面上的保形塗層組合。在一些實行方案中，保形塗層可包括可替換聚合物網路的分級界面層。在一些態樣中，分級界面層可包括氟化錫層及在氟化錫層與陽極之間形成之錫-鋰合金區域。響應於電池之操作循環，錫-鋰合金區域可形成在陽極與氟化錫層之間均勻分散之氟化鋰層。

【0052】 在各個實行方案中，使用本揭示案之各種態樣的鋰硫電池可包括自外部來源，例如地下來源及/或外星地下來源提取的電活性材料。在此類實行方案中，陰極可經製備為包括功能性孔隙的不含硫之陰極，該等孔隙可微觀限定陰極內之電活性材料。在一些態樣中，陰極可包括有包括接合在一起之許多碳質顆粒的聚集物，且可包括有包括接合在一起之許多聚集物的團聚物。在一個實行方案中，用於形成陰極(及/或陽極)之碳質材料可經調諧以界定獨特孔徑、孔徑範圍、及體積。在一些實行方案中，碳質顆粒可包括具有及沒有三區段顆粒之非三區段顆粒。在其他實行方案中，碳質顆粒可不包括三區段顆粒。各三區段顆粒可包括微孔、中孔、及大孔，且非三區段及三區段顆粒可各自具有 20 nm 至 300 nm 之近似範圍中之主要尺寸。各碳質顆粒可包括碳質片段，其彼此嵌套且藉由中孔來與直接相鄰碳質片段隔開。在一些態樣中，各碳質顆粒可具有在形狀上變化且與相鄰材料聚結的可變形周邊。

【0053】 一些孔隙可分佈於複數個碳質片段及/或碳質顆粒之可變形周邊中。在各個實行方案中，中孔可散佈於整個聚集物中，且大孔可散佈於整個複數個

團聚物中。在一個實行方案中，各中孔可具有 3.3 奈米(nm)與 19.3 nm 之間的主要尺寸，各聚集物可具有 10 nm 與 10 微米(μm)之間的近似範圍內之主要尺寸，且各團聚物可具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的近似範圍內之主要尺寸。如以下進一步描述，與獨特電解質調配物及保護層匹配之孔徑之特定組合可用於減少或減輕不當多硫化物擴散之有害影響，從而可進一步增加電池性能。

【0054】 圖 1 展示根據一些實行方案之示例性電池 100。電池 100 可為鋰硫電化電池、鋰離子電池、或鋰硫電池。電池 100 可具有主體 105，其包括第一基板 101、第二基板 102、陰極 110、與陰極 110 相對定位之陽極 120、及電解質 130。在一些態樣中，第一基板 101 可充當陽極 120 之集電器，且第二基板 102 可充當陰極 110 之集電器。陰極 110 可包括沉積於第二基板 102 上之第一薄膜 111，且可包括沉積於第一薄膜 111 上之第二薄膜 112。在一些實行方案中，電解質 130 可為液相電解質，其包括一或多種添加劑諸如硝酸鋰、氟化錫、碘化鋰、雙(草酸)硼酸鋰(LiBOB)、硝酸銫、氟化銫、離子液體、氟化鋰、氟化醚、TBT、MBT、DPT 及/或類似者。此等示例性添加劑之合適溶劑套裝可包括各種稀釋比率，包括 1:1:1 之 1,3-二氧戊環(DOL)、1,2-二甲氧基乙烷(DME)、四乙二醇二甲醚(TEGDME)、及/或類似者。

【0055】 雖然為了簡單起見未展示，但在一個實行方案中，鋰層可電沉積於陽極 120 之一或多個暴露碳表面上。在一些情況下，鋰層可包括藉由鋰在陽極 120 之暴露表面上之異位電沉積來提供的元素鋰。在一些態樣中，鋰層可包括鋰、鈣、鉀、鎂、鈉、及/或銫，其中各金屬可異位沉積於陽極 120 之暴露碳表面上。在電池 100 之操作循環期間，鋰層可提供可用於自陰極 110 來回傳輸之鋰離子。因此，電池 100 可不需要用於操作之額外鋰來源。代替使用硫化鋰，元素硫(S_8)可預負載於陰極 110 中形成之各種孔隙或多孔網路中。在電池之操作循環期間，元素硫可形成鋰硫錯合物，該等錯合物與習知陰極設計相比，可微觀

限定(至少暫時)更大量之鋰。因此，電池 100 可在性能上超過依賴於此類習知陰極設計之電池。

【0056】 在各個實行方案中，在電池 100 之放電循環期間，鋰層可解離且/或分離成鋰離子 125 及電子 174。鋰離子 125 可通過電解質 130 自陽極 120 朝向陰極 110 遷移到其在陰極 110 內之電化學有利位置，如圖 1 之實例中所示。隨著鋰離子 125 移動通過電解質 130，電子 174 自鋰離子 125 中釋放並變得可用於攜帶電荷，且因此在陽極 120 與陰極 110 之間傳導電流。因此，電子 174 可通過外部電路自陽極 120 行進至陰極 110，以為負載 172 供電。負載 172 可為任何合適電路、裝置、或系統，諸如(但不限於)燈泡、消費性電子產品、或電動車(EV)。

【0057】 在一些實行方案中，電池 100 可包括固體電解質界面相層 140。在一些情況下，在電池 100 之操作循環期間，固體電解質界面相層 140 可人工地在陽極 120 上形成。在此類情況下，固體電解質界面相層 140 亦可稱為人工固體電解質界面相或 A-SEI。固體電解質界面相層 140 在形成為 A-SEI 時可包括錫、錳、鉬、及/或氟化合物。具體而言，鉬可提供陽離子，且氟化合物可提供陰離子。陽離子及陰離子可彼此相互作用以產生鹽，諸如氟化錫、氟化錳、氮化矽、氮化鋰、硝酸鋰、磷酸鋰、氧化錳、氧化鋰鑭鋯(*LLZO*，$Li_7La_3Zr_2O_{12}$)等。在一些情況下，A-SEI 可響應於鋰離子 125 暴露於電解質 130 而形成，該電解質可包括有包括錫及/或氟的基於溶劑之溶液。

【0058】 在各個實行方案中，在電池 100 活化之前，固體電解質界面相層 140 可人工提供於陽極 120 上。或者，在一個實行方案中，例如在電池 100 之操作循環期間，固體電解質界面相層 140 可自然地形成於陽極 120 上。在一些情況下，固體電解質界面相層 140 可包括可作為微塗層施加至陽極 120 的外部屏蔽材料層。以此方式，在陽極 120 之面向電解質 130 之部分上形成固體電解質界面相層 140 可由於電解質 130 之電化學還原而引起，進而可減少陽極 120 之不受控制的

分解。

【0059】 在一些實行方案中，電池 100 可包括位於固體電解質界面相層 140 側面之障壁層 142，例如，如圖 1 所示。障壁層 142 可包括塗佈及/或沉積在陽極 120 上之機械強度增強劑 144。在一些態樣中，機械強度增強劑 144 可為電池 100 提供結構支援，可防止來自陽極 120 之鋰枝晶形成，且/或可防止鋰枝晶伸出至整個電池 100 中。在一些實行方案中，機械強度增強劑 144 可形成為陽極 120 上之保護塗層，且可包括一或多個碳同素異形體、碳奈米洋蔥(CNO)、奈米管(CNT)、還原氧化石墨烯、氧化石墨烯(GO)、及/或碳奈米鑽石。在一些情況下，固體電解質界面相層 140 可在機械強度增強劑 144 內形成。

【0060】 在一些實行方案中，第一基板 101 及/或第二基板 102 可為固體銅金屬箔且可影響電池 100 之能量容量、倍率性能、壽命、及長期穩定性。例如，為了控制電池 100 之能量容量及其他性能屬性，第一基板 101 及/或第二基板 102 可經受蝕刻、塗碳層、或其他合適處理，以增加電池 100 之電化學穩定性及/或電導性。在其他實行方案中，根據電池 100 之最終用途應用及/或性能要求，第一基板 101 及/或第二基板 102 可包括一些鋁、銅、鎳、鈦、不銹鋼及/或碳質材料或可由其形成。例如，第一基板 101 及/或第二基板 102 可經個別地調諧或定製以使得電池 100 滿足一或多個性能要求或度量。

【0061】 在一些態樣中，第一基板 101 及/或第二基板 102 可為至少部分地基於發泡體或源自發泡體的，且可選自金屬發泡體、金屬絲網、金屬篩網、有孔金屬、或基於薄片之三維(3D)結構中之任何一者或多者。在其他態樣中，第一基板 101 及/或第二基板 102 可為金屬纖維墊、金屬奈米線墊、導電聚合物奈米纖維墊、導電聚合物發泡體、導電聚合物塗層纖維發泡體、碳發泡體、石墨發泡體、或碳氣凝膠。在一些其他態樣中，第一基板 101 及/或第二基板 102 可為碳乾凝膠、石墨烯發泡體、氧化石墨烯發泡體、還原氧化石墨烯發泡體、碳纖維

發泡體、石墨纖維發泡體、剝離石墨發泡體、或其任何組合。

【0062】 圖 2 展示根據一些實行方案之另一示例性電池 200。電池 200 可在許多方面類似於圖 1 之電池 100，使得相同元件之描述在此不予以重複。在一些實行方案中，電池 200 可為下一代電池，諸如鋰金屬電池及/或具有固態電解質之固態電池。在其他實行方案中，電池 200 可包括液相電解質 230 且可因此包括本文揭示之任何保護層及/或電解質化學物質或組合物。

【0063】 在一些其他實行方案中，電解質 230 可為固體或基本上固體。例如，在一些情況下，電解質 230 可以凝膠相開始，且然後在電池 200 活化後凝固。電池 200 可藉由將習知碳支架陽極替換為在最初空的腔體中沉積之單一固體金屬鋰層來減少與多硫化物穿梭效應相關之比容量或能量損耗。例如，雖然圖 1 之電池 100 之陽極 120 可包括碳支架，但圖 2 之電池 200 之陽極 220 可為不含任何碳材料之鋰金屬陽極。在一個實行方案中，鋰金屬陽極可形成為單個固體鋰金屬層且被稱為「鋰金屬陽極」。

【0064】 與各種陰極材料相關之能量密度增加可基於是否將鋰金屬預負載於陰極 210 中及/或該鋰金屬是否在電解質 230 中佔優勢。陰極 210 及/或電解質 230 可提供可用於使陽極 220 鋰化之鋰。例如，具有高容量陰極之電池可能需要更厚或能量更密集之陽極，以供應高容量陰極使用所需要的增加數量之鋰。在一些實行方案中，陽極 220 可包括能夠用其中沉積之鋰逐步填充之支架碳質結構。與習知石墨陽極相比，此等碳質結構可能夠在陽極 220 內保持更大量之鋰，該等習知石墨陽極可限於僅承載被嵌入於交替石墨烯層之間的鋰或可用鋰來電鍍。例如，習知石墨陽極可使用六個碳原子來保持單個鋰原子。相比之下，藉由使用純鋰金屬陽極，諸如陽極 220，本文揭示之電池可減少或甚至消除陽極 220 中之碳使用，這與習知石墨陽極相比，可允許陽極 220 在相對較小體積中儲存更大量之鋰。以此方式，電池 200 之能量密度可大於類似大小之習知電池。

【0065】 可製備鋰金屬陽極，諸如陽極 220，以與經設計以抑制自陽極中鋰枝晶之形成及生長的固態電解質一起發揮作用。在一些態樣中，隔板 250 可進一步限制枝晶形成及生長。當圖 1 之電解質 130 仍減少鋰枝晶形成時，隔板 250 可具有類似離子導電性。在一些態樣中，隔板 250 可由含有陶瓷之材料形成且因此可能不能與金屬鋰進行化學反應。因此，隔板 250 可用於控制通過分佈在隔板 250 中之孔隙進行的鋰離子傳輸，同時藉由阻礙電子流過或穿過電解質 230 來防止短路。

【0066】 在一個實行方案中，空隙空間(為簡單起見未展示)可在電池 200 中在陽極 220 處或附近形成。在此實行方案中，電池 200 之操作循環可導致鋰沉積至空隙空間中。因此，空隙空間可變成或轉變成含鋰區域(諸如固體鋰金屬層)且充當陽極 220。在一些態樣中，空隙空間可響應於電池 200 之含有金屬之非電活性組分與含有石墨烯之組分之間的化學反應來產生。具體而言，在操作循環期間，含有石墨烯之組分可與沉積至空隙空間中之鋰進行化學反應且產生鋰化石墨(LiC_6)或圖案化鋰金屬。由化學反應產生之鋰化石墨可產生或導致鋰離子及/或電子之產生及/或釋放，該等離子或電子可用於在電池 200 之放電循環期間在陽極 220 與陰極 210 之間載運電荷或「電流」。

【0067】 而且，在陽極 220 為固體鋰金屬層的實行方案中，電池 200 可能夠每單位體積保持更多電活性材料及/或鋰(如與具有支架碳及/或嵌入鋰化石墨陽極之電池相比)。在一些態樣中，陽極 220 當經製備為固體鋰金屬層時，可導致與具有支架碳及/或嵌入鋰化石墨陽極之電池相比，電池 200 具有更高能量密度及/或比容量，由此產生更長放電循環時間及每單位時間之額外功率輸出。在使用固態電解質並非所期望或並非最佳的情況下，圖 2 之電池 200 之電解質 230 可用本文揭示之任何液相電解質化學物質及/或組合物來製備。另外地或替代地，電解質 230 可包括鋰及/或鋰離子，其可用於分別在放電及充電循環期間自

陽極 220 至陰極 210 以及反過來自陰極至陽極之循環傳輸。

【0068】 為了減少自預負載在陰極 210 中之元素硫 281 產生之多硫化物 282 至電解質 230 中之遷移，電池 200 可包括一或多個獨特多硫化物保持特徵。例如，鑑於多硫化物可溶解於電解質 230 中，預期由於電化學電位之差異、化學梯度、及/或其他現象而導致一些多硫化物可自陰極 210 漂移或遷移至陽極 220。多硫化物 282(尤其長鏈形式多硫化物)之遷移可能阻礙鋰離子自陽極 220 傳輸至陰極 210，進而可能減少可用於產生可為諸如電動車(EV)之負載 272 供電之電流的電子數目。在一些態樣中，鋰離子 225 可自陽極 220 處或附近之一或多個起始位置 226 沿著傳輸通道來傳輸至陰極 210 處或附近之一或多個最終位置 227，如圖 2 之實例中描繪。

【0069】 在一些實行方案中，聚合物網路 285 可安置在陽極 220 上，以減少多硫化物 282 自陽極 220 至陰極 210 之不受控制的遷移。聚合物網路 285 可包括一或多種碳質材料層，其用在暴露於鋰陽極表面後經由伍茲反應來彼此交聯之氟化聚合物鏈接枝。可包括(但不限於)石墨烯、少層石墨烯 FLG 及多層石墨烯 MLG 之聚合物網路 285 之碳質材料可用含有碳-氟(C-F)鍵之氟化聚合物鏈化學接枝。此等 C-F 鍵可與來自陽極 220 之表面之鋰金屬化學反應，以產生高度離子碳-鋰鍵(C-Li)。此等所形成 C-Li 鍵進而可與聚合物鏈之 C-F 鍵反應以形成新的碳-碳鍵，其亦可使聚合物鏈交聯成(且由此形成)聚合物網路並產生氟化鋰(LiF)。

【0070】 所得氟化鋰可沿著聚合物網路 285 之整個周邊均勻分佈，以使得在電池循環期間，鋰離子被均勻消耗，從而產生可形成或以其他方式包括氟化鋰的界面層 283。界面層 283 可沿著陽極 220 的面向陰極 210 之表面或部分延伸，如圖 2 所示。因此，鋰離子 225 不太可能彼此組合及/或反應且更可能與可由聚合物網路 285 中之氟化聚合物鏈提供之氟原子組合及/或反應。鋰-鋰化學反應之

所得減少使造成不當鋰-金屬枝晶形成的鋰-鋰鍵結降低。另外，在一些實行方案中，聚合物網路 285 可替換在陽極 220 與電解質 230 之間自然地或人工形成之界面相層 240。

【0071】 在一個實行方案中，聚合物網路 285 之界面層 283 與陽極 220 接觸，且保護層 284 安置在界面層 283 之頂部(諸如在界面層 283 與界面相層 240 之間)。在一些態樣中，界面層 283 及保護層 284 可共同地界定具有不同密度之交聯氟聚合物鏈之梯度，例如，如參考圖 7 所描述。

【0072】 在一些其他實行方案中，電池 200 可包括安置在陰極 210 上之保護性晶格 280。保護性晶格 280 可包括三官能環氧化合物及基於二胺寡聚物之化合物，其可彼此發生化學反應以產生氮及氧原子。可由保護性晶格 280 提供之氮及氧原子可與多硫化物 282 結合，由此限定多硫化物 282 於陰極 210 及/或保護性晶格 280 內。陰極 210 及/或保護性晶格 280 中之任一者可包括碳-碳鍵及/或能夠在電池 200 之操作循環期間撓曲及/或在體積上膨脹之區域，從而可將在操作循環期間產生之多硫化物 282 限定於陰極 210。

【0073】 圖 1 之電解質 130 及圖 2 之電解質 230 可根據本文揭示之一或多種配方來製備。例如，用於電解質 130 及/或電解質 230 中之三元溶劑套裝可包括 DME、DOL 及 TEGDME。在一個實行方案中，溶劑混合物可藉由將 5800 μL DME、2900 μL DOL 及 1300 μL TEGDME 混合且在室溫下(77°F或 25°C)攪拌來製備。接著，可稱取 0.01 mol (2,850.75 mg)之 LiTFSI。之後，可藉由在室溫下攪拌將 0.01 mol 之 LiTFSI 溶解於溶劑混合物中，以製備大約 10 mL 於 DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 1:4:1)中之 1 M LiTFSI。最後，可將大約 223 mg $LiNO_3$ 添加至 10 mL 溶液，以產生 10 mL 具有大約 2 重量% $LiNO_3$ 的於 DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 = 58:29:13)中之 1 M LiTFSI。

【0074】 另外地或替代地，用於電解質 130 及/或電解質 230 中之三元溶劑套

裝可包括 DME、DOL、TEGDME、及 TBT 或 MBT。溶劑混合物可藉由將 2,000 μL DME、8,000 μL DOL 及 2,000 μL TEGDME 混合且在室溫下(68°F或 25°C)攪拌來製備。接著，可稱取 0.01 mol(2,850.75 mg)之 LiTFSI 且藉由在室溫下攪拌來溶解於大約 3 mL 溶劑混合物中。之後，可將經溶解之 LiTFSI 及額外溶劑混合物(約 8,056 mg)在 10 mL 容量瓶中混合，以產生於 DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 1:4:1)中之大約 1 M LiTFSI。最後，可將大約 0.05 mmol (約 12.5 mg) TBT 或 MBT 添加至 10 mL 溶液，以產生 10 mL 5M TBT 或 MBT 溶液。

【0075】 圖 3 展示根據一些實行方案之示例性電極 300。在各個實行方案中，電極 300 可為圖 1 之電池 100 之陰極 110 及/或陽極 120 之一個實例。在一些其他實行方案中，電極 300 可為圖 2 之電池 200 之陰極 210 之一個實例。當電極 300 經實行為陰極(例如圖 1 之電池 100 之陰極 110)時，電極 300 可暫時微觀限定電活性材料諸如元素硫，這可降低可用於與鋰反應以產生多硫化物之硫的量。在一些態樣中，電極 300 可提供過量供應之鋰及/或鋰離子，從而可彌補與基於鋰之電池相關的第一循環操作損耗。

【0076】 在一些實行方案中，電極 300 可為多孔的且可接受液相電解質，例如圖 1 之電解質 130。懸浮於電解質 130 中之電活性物質，諸如鋰離子 125，可與預負載至電極 300 之孔隙中之元素硫發生化學反應以產生多硫化物，其進而可在電池循環期間被截留在電極 300 中。在一些態樣中，電極 300 可沿著一或多個撓曲點在體積上膨脹以保持在電池循環期間產生之額外數量之多硫化物。藉由限定多硫化物於電極 300 內，本文揭示之標的物之態樣可允許鋰離子 125 在電池 100 之放電循環期間，通過電解質 130 自陽極 120 自由流動至陰極 110(例如，不受到多硫化物之阻礙)。例如，當鋰離子 125 到達陰極 110 且與包含在陰極 110 內或與陰極相關之元素硫反應時，硫根據以下次序以遞減鏈長被還原為多硫化鋰(Li_2S_x)：$Li_2S_8 \rightarrow Li_2S_6 \rightarrow Li_2S_4 \rightarrow Li_2S_2 \rightarrow Li_2S$，其中 $2 \leq x \leq 8$)。高階多硫化物

可溶解於各種類型之溶劑及/或電解質中，由此干擾健康電池操作所必需的鋰離子傳輸。由電極 300 保持此類高階多硫化物由此允許鋰離子 125 通過電解質 130 更自由地流動，這進而可增加可用於將電荷自陽極 120 載運至陰極 110 的電子之數目。

【0077】 電極 300 可包括由寬度 305 界定之主體 301，且可包括第一薄膜 310 及第二薄膜 320。第一薄膜 310 可包括接合在一起以形成電極 300 之第一多孔結構 316 的複數個第一聚集物 312。在一些情況下，第一多孔結構 316 可具有大約 0 與 500 S/m 之間的電導率。在其他情況下，第一電導率可在大約 500 與 1,000 S/m 之間。在一些其他實例中，第一電導率可大於 1,000 S/m。在一些態樣中，第一聚集物 312 可包括碳奈米管(CNT)、碳奈米洋蔥(CNO)、片狀石墨烯、皺褶石墨烯、在碳質材料上生長之石墨烯、及/或在石墨烯上生長之石墨烯。

【0078】 在一些實行方案中，第一聚集物 312 可用複數個第一奈米顆粒 314 來修飾。在一些情況下，第一奈米顆粒 314 可包括錫、鋰合金、鐵、銀、鈷、半導體材料及/或金屬諸如矽及/或類似者。在一些態樣中，CNT 由於其提供每單位體積之高暴露表面積及相對高溫(諸如 77°F或 25°C以上)下之穩定性的能力，可用作第一奈米顆粒 314 之支撐材料。例如，第一奈米顆粒 314 可固定(諸如藉由修飾(decoration)、沉積、表面改質或類似方法)於 CNT 及/或其他碳質材料之暴露表面上。第一奈米顆粒 314 可與 CNT 及/或其他碳質材料之暴露表面上之化學可利用碳反應。

【0079】 第二薄膜 320 可包括接合在一起以形成第二多孔結構 326 的複數個第二聚集物 322。在一些情況下，第一多孔結構 316 及/或第二多孔結構 326 之電導率可在大約 0 S/m 與 250 S/m 之間。在第一多孔結構 316 包括比第二多孔結構 326 更高濃度之聚集物的情況下，第一多孔結構 316 可具有比第二多孔結構 326 更高之電導率。在一個實行方案中，第一電導率可在大約 250 S/m 與 500 S/m

之間，而第二電導率可在大約 100 S/m 與 250 S/m 之間。在另一個實行方案中，第二電導率可在大約 250 S/m 與 500 S/m 之間。在另一個實行方案中，第二電導率可大於 500 S/m。在一些態樣中，第二聚集物 322 可包括 CNT、CNO、片狀石墨烯、皺褶石墨烯、在碳質材料上生長之石墨烯、及/或在石墨烯上生長之石墨烯。

【0080】 第二聚集物 322 可用複數個第二奈米顆粒 324 來修飾。在一些實行方案中，第二奈米顆粒 324 可包括鐵、銀、鈷、半導體材料及/或金屬諸如矽及/或類似者。在一些情況下，CNT 亦可用作第二奈米顆粒 324 之支撐材料。例如，第二奈米顆粒 324 可固定(諸如藉由修飾、沉積、表面改質或類似方法)於 CNT 及/或其他碳質材料之暴露表面上。第二奈米顆粒 324 可與 CNT 及/或其他碳質材料之暴露表面上之化學可利用碳反應。

【0081】 在一些態樣中，第一薄膜 310 及/或第二薄膜 320(以及安置於其相應緊鄰前一個薄膜上之任何額外薄膜)可形成為材料及/或聚集物之層或區域。該層或區域可具有幾分之一奈米至幾微米範圍內之厚度，諸如大約 0 與 5 微米之間、大約 5 與 10 微米之間、大約 10 與 15 微米之間、或大於 15 微米。本文揭示之任何材料及/或聚集物(諸如 CNO)可摻入第一薄膜 310 及/或第二薄膜 320 中，以產生所描述之厚度水準。

【0082】 在一些實行方案中，第一薄膜 310 可藉由化學沉積、物理沉積來沉積至圖 1 之第二基板 102 上，或透過諸如 Frank-van der Merwe 生長、Stranski-Krastonov 生長、Volmer-Weber 生長及/或類似者之技術來逐層生長。在其他實行方案中，第一薄膜 310 可藉由磊晶或涉及材料之磊晶生長的其他合適薄膜沉積方法來沉積至第二基板 102 上。第二薄膜 320 及/或後續薄膜可與參考第一薄膜 310 所描述之方式類似的方式沉積於其相應緊鄰前一個薄膜上。

【0083】 在各個實行方案中，第一聚集物 312 及/或第二聚集物 322 中之各者

可為藉由鍵結或融合在一起之許多相對較小顆粒來形成之相對較大顆粒。因此，相對較大顆粒之外表面積可顯著小於許多相對較小顆粒之組合表面積。將聚集物保持在一起之力可為例如共價、離子鍵或由先前初級顆粒之燒結或複雜物理纏結所產生的其他類型之化學鍵。

【0084】 如以上論述，第一聚集物 312 可接合在一起以形成第一多孔結構 316，且第二聚集物 322 可接合在一起以形成第二多孔結構 326。第一多孔結構 316 之電導率可基於第一多孔結構 316 內之第一聚集物 312 之濃度水準，且第二多孔結構 326 之電導率可基於第二多孔結構 326 內之第二聚集物 322 之濃度水準。在一些態樣中，第一聚集物 312 之濃度水準可導致第一多孔結構 316 具有相對較高電導率，且第二聚集物 322 之濃度水準可導致第二多孔結構 326 具有相對較低電導率(使得第一多孔結構 316 具有比第二多孔結構 326 更大之電導率)。第一多孔結構 316 及第二多孔結構 326 之電導率之所得差異可產生跨電極 300 之電導率梯度。在一些實行方案中，電導率梯度可用於控制或調整整個電極 300 之電導及/或圖 1 之電池 100 之一或多次操作。

【0085】 如本文所用，相對較小來源顆粒可稱為「初級顆粒」且藉由初級顆粒形成之相對較大聚集物可稱為「次級顆粒」。如圖 1、圖 8 至 10 及在整個本揭示案中別處所示，初級顆粒可為或包括融合及/或接合在一起之多個石墨烯薄片、層、區域、及/或奈米片。因此，在一些情況下，碳奈米洋蔥(CNO)、碳奈米管(CNT)、及/或其他可調碳材料可用於形成初級顆粒。在一些態樣中，一些聚集物可具有大約 500 nm 與 25 μm 之間的主要尺寸(諸如長度、寬度、及/或直徑)。另外，一些聚集物可包括以正交角度接合在一起之石墨烯薄片、層、區域、及/或奈米片的稱為「天生顆粒」的初級顆粒之天生形成較小集合。在一些情況下，此等天生顆粒可各自具有大約 50 nm 與 250 nm 之間的相應尺寸。

【0086】 此類天生顆粒之表面積及/或孔隙率可藉由次級過程來賦予，諸如藉

由使用單獨或組合之蒸汽、氫氣體、二氧化碳、氧、臭氧、KOH、ZnCl2、H3PO4、或其他類似化學劑中之一或多者的熱、電漿、或組合熱-電漿過程來進行碳活化。在一些實行方案中，第一多孔結構 316 及/或第二多孔結構 326 可由碳質氣態物質產生，該等物質可藉由處於不均衡條件下之氣-固反應來控制。以此方式產生第一多孔結構 316 及/或第二多孔結構 326 可涉及對於由含碳電漿物質(其可藉由含碳進料氣態及/或電漿物質在合適化學反應器中之激發或壓實來產生)之受控冷卻來形成之含碳基團進行重組。

【0087】 在一些實行方案中，第一聚集物 312 及/或第二聚集物 322 可具有大於 99%的各相應聚集物內碳與除了氫以外之其他元素之百分比。在一些情況下，各聚集物之中值粒徑可在大約 0.1 微米與 50 微米之間。第一聚集物 312 及/或第二聚集物 322 亦可包括金屬有機構架(MOF)。

【0088】 在一些實行方案中，第一多孔結構 316 及第二多孔結構 326 可共同界定主結構 328，例如，如圖 3 所示。在一些情況下，主結構 328 可基於碳支架且/或可包括修飾碳，例如，如圖 8 所示。主結構 328 可為電極 300 提供結構界定。在一些情況下，主結構 328 可經製造為正電極並用於圖 1 之陰極 110。在其他實行方案中，主結構 328 可經製造為負電極並用於圖 1 之陽極 120。在一些其他實行方案中，主結構 328 可包括具有不同大小之孔隙，例如由 IUPAC 定義之微孔、中孔及/或大孔。在一些情況下，至少一些微孔可具有大約 1.5 nm 之寬度，其可足夠大以允許硫預負載至電極 300 中且仍足夠小以限定多硫化物於電極 300 內。

【0089】 主結構 328 當提供於如圖 3 所示之電極 300 內時，可包括藉由第一多孔結構 316 及/或第二多孔結構 326 之暴露表面及/或輪廓來產生之微孔、中孔、及/或大孔通道。此等通道可允許主結構 328 接收電解質，例如，藉由將鋰離子傳輸至電池 100 之陰極 110。具體而言，電解質 130 可浸潤主結構 328 之各

種多孔通道且均勻分散在整個電極 300 及/或電池 100 之其他部分中。電解質 130 浸潤至主結構 328 之此類區域中可允許自陽極 120 遷移至陰極 110 之鋰離子 125 同與陰極 110 相關之元素硫發生反應以形成鋰硫錯合物。因此，元素硫可保持額外量之鋰離子，其另外可使用非硫化學物質諸如鋰鈷氧化物(LiCoO)或其他鋰離子電池來達成。

【0090】 在一些態樣中，第一多孔結構 316 及/或第二多孔結構 326 中之各者可具有基於單獨或組合使用蒸汽、氫氣體、二氧化碳、氧、臭氧、KOH、ZnCl2、H3PO4、或其他類似化學劑中之一或多者進行的熱、電漿、或組合熱-電漿過程中之一或多者的孔隙率。例如，在一個實行方案中，大孔通道可具有大於 50 nm 之主要尺寸，中孔通道可具有大約 20 nm 與 50 nm 之間的主要尺寸，且微孔通道可具有少於 4 nm 之主要尺寸。因此，大孔通道及中孔通道可提供用於傳輸鋰離子 125 之可調管路，且微孔通道可限定電極 300 內之活性材料。

【0091】 在一些實行方案中，電極 300 可包括一或多個額外薄膜(為簡單起見未展示)。一或多個額外薄膜中之各者可包括跨不同薄膜來彼此互連之個別聚集物，其中至少一些薄膜具有不同濃度水準之聚集物。因此，任何薄膜之濃度水準可經改變(諸如藉由梯度)以達成特定電阻(或電導)值。例如，在一些實行方案中，聚集物之濃度水準可在第一薄膜 310 與最後一個薄膜之間逐步下降(諸如在圖 1 描繪之方向 195 上)，且/或個別薄膜可具有大約 10 微米與大約 200 微米之間的平均厚度。另外地或替代地，第一薄膜 310 可具有相對較高濃度之碳質聚集物，且第二薄膜 320 可具有相對較低濃度之碳質聚集物。在一些態樣中，相對較高濃度之聚集物對應於相對較低電阻，且相對較低濃度之聚集物對應於相對較高電阻。

【0092】 主結構 328 可經製備成具有第一聚集物 312 及/或第二聚集物 322 之暴露表面上之多個活性位點。在將電極 300 併入電池 100 中之前，此等活性位點

以及第一聚集物 312 及/或第二聚集物 322 之暴露表面可有利於異位電沉積。電鍍為可藉由施加及/或調節電流透過金屬陽離子之化學還原來產生鋰層 330(包括主結構 328 之暴露表面上之鋰)的過程。在電極 300 充當圖 1 中之電池 100 之陽極 120 的實行方案中，主結構 328 可經電鍍，使得鋰層 330 具有大約 1 與 5 微米(μm)之間、5 μm 與 20 μm 之間、或大於 20 μm 之厚度。在一些情況下，在組裝電池 100 之前，異位電沉積可在獨立於電池 100 之位置處執行。

【0093】 在各個實行方案中，由鋰層 330 提供之過量鋰可增加可用於在電池 100 中傳輸之鋰離子 125 之數目，由此增加電池 100 之儲存容量、壽命、及性能(與傳統鋰離子及/或鋰硫電池相比較)。

【0094】 在一些態樣中，基於與第一聚集物 312 及/或第二聚集物 322 之化學反應，鋰層 330 可產生嵌鋰石墨(LiC_6)及/或鋰化石墨。由於在電池 100 之操作循環期間電化學梯度之差異，在交替石墨烯層之間嵌入之鋰可在電極 300 內遷移或傳輸，這進而可增加電池 100 之能量儲存及功率輸送。

【0095】 圖 4 展示根據一些實行方案之包括保護性晶格 402 之示例性電池 400 的部分的圖。在一些實行方案中，保護性晶格 402 可安置於電池 200 之陽極 220 上。在其他實行方案中，保護性晶格 402 可安置於電池 200(或其他合適電池)之陰極 210 上。在一些態樣中，保護性晶格 402 可為圖 2 之保護性晶格 280 之一個實例。保護性晶格 402 可與許多部件(例如，陽極、陰極、相關集電器、碳質材料、電解質、及隔板)一起以與圖 1 之電池 100 及/或圖 2 之電池 200 類似的方式發揮作用。

【0096】 保護性晶格 402 可包括三官能環氧化合物及基於二胺寡聚物之化合物，其可彼此發生化學反應以產生 3D 晶格結構(例如，如圖 6 及圖 8 所示)。在一些態樣中，保護性晶格 402 可藉由提供可與存在於多硫化物中之鋰化學結合，由此阻礙多硫化物通過電解質 130 遷移之氮及氧原子來防止多硫化物在電池 400

內遷移。因此，鋰離子 125 可更自由地自圖 1 之陽極 120 及陰極 110 傳輸，由此增加電池性能度量。

【0097】 陰極 110 之循環使用可導致形成至少部分地延伸至陰極 110 中之裂縫 404。在一個實行方案中，保護性晶格 402 可分散在整個裂縫 404 中，由此減少陰極 110 對於陰極 110 之體積膨脹期間之破裂的敏感性，該體積膨脹係由在循環使用期間多硫化物保持在陰極 110 內所導致的。在一個實行方案中，基於二官能或更高官能度環氧化合物與胺或醯胺化合物之間的化學反應，圖 4 之保護性晶格 402 可具有交聯的 3D 結構。例如，二官能或更高官能度環氧化合物可為三羥甲基丙烷三縮水甘油醚(TMPTE)、參(4-羥苯基)甲烷三縮水甘油醚、或參(2,3-環氧丙基)異氰脲酸酯，且二官能或更高官能度胺化合物可為二醯肼亞碸(DHSO)、或聚醚胺中之一者，例如藉由主鏈中之重複氧丙烯單元來表徵的 JEFFAMINE ® D-230。

【0098】 在各個實行方案中，該等化學化合物可以許多數量、量、比率及/或組成來彼此組合及反應，以達成關於與在電池 400 操作期間產生之多硫化物之結合而言的不同性能能力。例如，在一個實行方案中，113 mg TMPTE 及 134 mg JEFFAMINE ® D-230 聚醚胺可混合在一起且用 1 mL 至 10 mL 之四氫呋喃(THF)或任何其他溶劑稀釋。以 113 mg TMPTE/134 mg JEFFAMINE ® D-230 聚醚胺之示例性比率，可將額外量之 TMPTE 及/或 JEFFAMINE 混合在一起且在 THF 或任何其他溶劑中稀釋。對於該實行方案，概念驗證(POC)資料表明，圖 4 之保護性晶格 402 具有圖 1 之陰極 110 或圖 2 之陰極 210 之大約 2.6 重量%的界定重量。在其他實行方案中，保護性晶格 402 可具有陰極 110 及/或陰極 210 之大約 2 重量%至 21 重量%之重量，其中在保護性晶格 402 之大約 10 重量%或更多的重量水準下可預期陰極 110 及/或陰極 210 之阻抗增加。

【0099】 在各個實行方案中，保護性晶格 402 可基於-NH_2 基團及環氧基團之

莫耳及/或莫耳比來製造，且可進一步適應二官能或更高官能度環氧化合物與胺或醯胺化合物之間的各種交聯形式。在一些態樣中，此類交聯形式可包括完全交聯階段，例如，其中一個-NH_2 基團與兩個環氧基團化學鍵結且可進一步延伸至包括一個 NH_2 基團與僅一個環氧基團化學鍵結之組態。更進一步，在一或多個實行方案中，可製備包括過度數量(高於在此呈現之比率)之-NH_2 基團之混合物，以便為保護性晶格 402 提供額外多硫化物結合能力。

【0100】 在一些其他實行方案中，可藉由將 201 g TMPTE 與 109 g 至 283 g 之間的 JEFFAMINE ® D-230 聚醚胺混合來製備保護性晶格 402。然後，可將所得混合物用 1 L 至 20 L 之所選溶劑(諸如 THF)來稀釋。可使所得稀釋溶液沉積及/或以其他方式安置於陰極 110 上，以達成 1 重量%至 10 重量%之間的交聯劑含量。以 201 g TMPTE/109 g 至 283 g JEFFAMINE ® D-230 聚醚胺之示例性比率，可將額外 TMPTE 及/或 JEFFAMINE 混合在一起且在 THF 或另一種合適溶劑中稀釋。

【0101】 在又其他實行方案中，可藉由將 201 g TMPTE 與 74 g 至 278 g 之間的 DHSO 混合來製備保護性晶格 402。然後，可將所得混合物用 1 L 至 20 L 之所選溶劑(諸如 THF)來稀釋。可使所得稀釋溶液沉積及/或以其他方式安置於陰極 110 上，以達成 1 重量%至 10 重量%之間的交聯劑含量。以 201 g TMPTE/201g 至 278g JEFFAMINE ® D-230 聚醚胺之示例性比率，可將額外 TMPTE 及/或 JEFFAMINE 混合在一起且在 THF 或另一種合適溶劑中稀釋。

【0102】 在一個實行方案中，二官能或更高官能度環氧化合物可與二官能或更高官能度胺化合物發生化學反應，以產生 3D 交聯形式之保護性晶格 402，其可包括官能性環氧化合物及含胺分子。在一些態樣中，保護性晶格 402 在沉積於圖 1 之陰極 110 或圖 2 之陰極 210 上時，可具有大約 1 nm 與 5 μm 之間的厚度。

【0103】 在一些實行方案中，保護性晶格 402 可增加陰極 110 或陰極 210 之

結構完整性，可減少表面粗糙度，且可保持多硫化物於陰極中。例如，在一個實行方案中，保護性晶格 402 可充當陰極之暴露表面上之鞘且與多硫化物結合，以防止其遷移及擴散至電解質 130 中。以此方式，本文揭示之標的物之態樣可藉由抑制多硫化物穿梭效應來防止(或至少減少)電池容量衰減。在一些態樣中，保護性晶格 402 亦可填充在圖 4 之陰極中形成之裂縫 404，以改良陰極塗層完整性。在各個實行方案中，保護性晶格 402 可在溶劑存在下藉由落模鑄造方法來製備，其中所得溶液可滲透至陰極 110 之裂縫 404 中且與陰極 110 中之多硫化物結合以防止其遷移及/或擴散至整個電解質 130 中。

【0104】 在各個實行方案中，保護性晶格 402 可提供可與在操作電池循環期間產生之多硫化物中之鋰化學鍵結的氮原子及/或氧原子。在一個實例中，多硫化物可與藉由例如 DHSO 提供之可利用氮原子鍵結。在另一實例中，多硫化物可與藉由例如 DHSO 提供之可利用氧原子鍵結。在又另一個實例中，多硫化物可與其他可利用氧原子鍵結。

【0105】 在一些其他實行方案中，如上所述之配方可藉由將 TMPTE 替換為參(4-羥苯基)甲烷三縮水甘油醚 910 及/或參(2,3-環氧丙基)異氰脲酸酯來改變。在各個實行方案中，基於二胺寡聚物之化合物可為(或可包括)JEFFAMINE ® D-230，或含有通常基於環氧丙烷(PO)、環氧乙烷(EO)、或混合 PO/EO 結構之聚醚主鏈的其他聚醚胺，例如 JEFFAMINE ® D-400、JEFFAMINE ® T-403。保護性晶格 402 亦可包括各種濃度水準之惰性分子，例如，各種長度之聚乙二醇鏈，其可允許微調保護性晶格之機械性質及各種原子與存在於多硫化物中之鋰的化學鍵結。

【0106】 圖 5 展示根據一些實行方案之包括氟化錫(SnF_2)層之陽極結構 500 的圖。具體而言，該圖描繪陽極結構 500 之剖視示意圖，其中與第一區域 A 相關之所有部件在第二區域 B 中具有相同對應物，其中第一區域 A 及第二區域 B 具

有圍繞集電器 520 之相反取向。因此，下文參考第一區域 A 之部件的描述同樣適用於第二區域 B 之部件。在一些態樣中，陽極 502 可為圖 1 之陽極 120 及/或圖 2 之陽極 220 的一個實例。

【0107】 正如所論述，鋰硫電池，諸如圖 1 之電池 100 及圖 2 之電池 200，作為轉化化學類型電化電池來操作，其中在操作之前及期間，預負載至陰極中之硫可快速溶解至電解質中。可由鋰化陽極提供且/或可在電解質中佔優勢之鋰解離成鋰離子，其適用於通過電解質自陽極傳輸至陰極。鋰離子之產生與電子之相應釋放有關，電子可流過外部電路以便為負載供電，如參考圖 1 所述。然而，當鋰離解成鋰離子及電子時，一些鋰離子可能會不期望地與陰極中產生之多硫化物發生反應，且因此可能不再可用於產生輸出電流或電壓。多硫化物對鋰離子之此消耗減少主電池(host cell)或電池之總容量，且亦可能有利於陽極之腐蝕，從而可導致電池故障。

【0108】 在一些實行方案中，保護層 516 可經提供為可在電池組裝或形成期間減少陽極 502 之化學反應性的鈍化塗層。在一些態樣中，保護層 516 可對於鋰離子而言為可滲透的，同時保護陽極 502 避免由鋰離子與多硫化物之間的化學反應導致的腐蝕。在其他實行方案中，保護層 516 可為人工固體電解質界面相(A-SEI)，其可替換自然存在之 SEI 及/或其他類型之習知 A-SEI。在各個實行方案中，保護層 516 可經沉積為安置在陽極 502 上之一或多個膜之頂部上的襯墊。在一些態樣中，保護層 516 可為在與電池之操作循環相關之電化學反應期間形成的自生層。在一些態樣中，保護層 516 可具有小於 5 微米之厚度。在其他態樣中，保護層 516 可具有 0.1 與 1.0 微米之間的厚度。

【0109】 在各個實行方案中，可有利於保護層 516 在陽極 502 上形成及/或沉積的一或多種工程化添加劑可提供於電池之電解質內。在其他實行方案中，工程化添加劑可為保護層 516 之活性成分。在一些態樣中，保護層 516 可提供錫離

子及/或氟離子，其可防止自陽極之第一邊緣518_1及第二邊緣518_2之不當鋰生長。

【0110】 分級層 514 可形成及/或沉積於陽極 502 上處於保護層 516 下方。在各個實行方案中，分級層 514 可防止包含在陽極 502 中或與其相關之鋰參與可導致含鋰枝晶自陽極 502 生長的與電解質 540 之不當化學相互作用及/或反應。分級層 514 亦可有利於基於經解離鋰離子與氟離子之間的化學反應來產生氟化鋰。正如所論述，在陽極 502 中或附近存在氟化鋰可減少多硫化物穿梭效應。例如，氟化鋰之形成(例如，由可利用鋰離子及氟離子)可跨陽極之全部第一邊緣518_1及/或第二邊緣518_2均勻發生。以此方式，在陽極 502 附近之電解質 540 中高鋰濃度之局部區域基本上得到抑制。因此，導致形成自陽極縱向延伸之含鋰枝晶結構的鋰-鋰鍵相應地得到抑制，由此引起鋰離子自陽極 502 自由地傳送至電解質中(例如，如在電池操作循環期間遇到的情況)。在一些態樣中，鋰在整個分級層 514 中之均勻分佈可在電池操作循環期間增加鋰離子通量之均勻性。在一些態樣中，分級層 514 可為大約 5 奈米(nm)之厚度。

【0111】 在一或多個實行方案中，分級層 514 可以一種方式在結構上加強主電池，該方式不僅減少或防止自陽極 502 之含鋰枝晶生長，而且增加陽極 502 在主電池之操作循環期間膨脹及收縮而不破裂之能力。在一些態樣中，分級層 514 具有(例如，一或多種構成性材料及/或成分，包括碳、錫、及/或氟)分級濃度梯度之 3D 架構，其有利於快速鋰離子傳輸。因此，分級層 514 顯著地改良總體電池效率及性能。

【0112】 在一些實行方案中，分級層 514 可提供保護層 516 可生長或沉積之電化學上理想的表面。例如，在一些態樣中，分級層 514 可包括以下各項之化合物及/或有機金屬化合物，其包括(但不限於)鋁、鎵、銦、鎳、鋅、鉻、釩、鈦、及/或其他金屬。在其他態樣中，分級層 514 可包括鋁、鎵、銦、鎳、鋅、鉻、釩、鈦、及/或其他金屬之氧化物、碳化物及/或氮化物。

【0113】 在一些實行方案中，分級層 514 可包括碳質材料，包括(但不限於)片狀石墨烯、少層石墨烯(FLG)、碳奈米洋蔥(CNO)、石墨烯奈米片、或碳奈米管(CNT)。在其他實行方案中，分級層 514 可包括碳、氧、氫、錫、氟及/或衍生自氟化錫的其他合適化學化合物及/或分子與一或多種碳質材料。分級層 514 可以不同濃度水準直接或間接地製備及/或沉積於陽極 502 上。例如，分級層 514 可包括 5 重量%碳質材料，其餘為 95 重量%氟化錫，其可導致來自氟化錫之氟原子及/或氟離子之相對均勻解離。

【0114】 其他合適比率包括：5%碳質材料與 95%氟化錫；10%碳質材料與 90%氟化錫、15%碳質材料與 85%氟化錫、20%碳質材料與 80%氟化錫、25%碳質材料與 75%氟化錫、30%碳質材料與 70%氟化錫、35%碳質材料與 65%氟化錫、40%碳質材料與 60%氟化錫、45%碳質材料與 55%氟化錫、50%碳質材料與 50%氟化錫、55%碳質材料與 45%氟化錫、55%碳質材料與 45%氟化錫、60%碳質材料與 40%氟化錫、65%碳質材料與 35%氟化錫、70%碳質材料與 30%氟化錫、75%碳質材料與 25%氟化錫、80%碳質材料與 20%氟化錫、85%碳質材料與 15%氟化錫、90%碳質材料與 10%氟化錫、95%碳質材料與 5%氟化錫。然後，氟原子及/或氟離子可與鋰離子均勻反應及組合，以形成氟化鋰，如下文進一步論述。

【0115】 在一些實行方案中，在陽極 502 與陰極(圖 5 中未展示)之間循環之鋰離子可在分級層 514 內產生錫-鋰合金區域 512。在一些態樣中，主電池之操作循環可導致氟化鋰均勻分散在錫-鋰合金區域 512 內。氟化鋰之均勻分散可有利於氟化錫層 510 內之至少一些氟化錫(II)(SnF_2)(及可分散至分級層 514 及/或保護層中之額外氟化錫)的去氟反應。可藉由去氟反應提供之氟原子及/或氟離子可與存在於陽極 502 中或附近之至少一些鋰離子化學鍵結，以產生氟化鋰(LiF)且由此相應地防止至少一些鋰離子彼此鍵結且產生自陽極 502 之鋰枝晶生長。

【0116】 例如，存在於氟化錫中之氟原子及/或氟離子中之至少一部分可自保

護層 516 中解離且經由一或多個化學反應產生錫離子(Sn^{2+})及氟離子($2F^-$)。自保護層 516 解離之氟原子及/或氟離子可化學鍵結至存在於電解質 540 中及/或分散於整個保護層 516 或分級層 514 中的至少一些鋰離子。在一些態樣中，解離之氟原子可在錫-鋰合金區域 512 中形成 Li—F 鍵或 Li—F 化合物。在其他態樣中，解離之氟原子可在分級層 514 內形成氟化錫層 510。

【0117】 另外，在一個實行方案中，至少一些去氟之氟化錫可均勻分散於整個分級層 514 中，以產生氟化鋰(LiF)晶體。氟化鋰晶體可充當電絕緣體且防止電子通過陽極 502 之第一邊緣 518_1 及/或第二邊緣 518_2 自陽極 502 流動至電解質 540 中。

【0118】 在各個實行方案中，分級層 514 可藉由原子層沉積(ALD)、化學氣相沉積(CVD)、或物理氣相沉積(PVD)中之一或多者沉積於陽極 502 上。例如，ALD 可用於在陽極 502 上沉積保護膜，例如像，在高壓鍵結過程期間至少部分地與電解質 540 反應之 ALD 膜。因此，使用可用於鋰轉移之原子平面，ALD 膜可用於產生保護層 516 或分級層 514。此鋰轉移可在原則上類似於對於少層石墨烯(FLG)或石墨所觀察到的轉移，其中 FLG 或石墨中之交替石墨烯層嵌入各種形式之鋰離子，包括呈氧化鈦鋰(LTO)、磷酸鐵鋰(PO_3)(LFP)形式。所描述形式之嵌入鋰(例如，LTO 及/或 LFP)可經定向以有利於快速鋰原子及/或鋰離子傳輸及/或擴散，其可有益於形成及/或合成氟化鋰(例如，在氟化錫層 510 中及/或在別處)，如先前描述。額外形式之嵌入鋰(例如，鈣鈦礦鈦酸鑭鋰(LLTO))亦可發揮作用來將鋰儲存於陽極 502 內。

【0119】 在一些實行方案中，分級層 514 可包括各種不同類型及/或形式之碳及/或碳質材料，其各自具有一或多種可經選擇或經組態以調整碳與存在於電解質 540 及/或陽極 502 中之污染物(諸如多硫化物)之反應性的物理屬性。在一些態樣中，可選擇物理屬性可包括(但不限於)孔隙率、表面積、表面官能化、或電導

率。另外，分級層 514 可包括黏合劑或可用於調整碳質材料之一或多種物理屬性以達成由碳質材料供應之碳與存在於電解質 540 及/或陽極 502 中之多硫化物的所需反應性的其他添加劑。

【0120】 在一個實行方案中，分級層 514 內之碳質材料可截留不當污染物且由此防止污染物與陽極 502 之暴露表面處可利用的鋰發生化學反應。作為替代，不當污染物(例如，多硫化物)可與分級層 514 內之碳質材料之各種暴露表面發生化學反應(例如，透過碳–鋰相互作用)。在一些實行方案中，分級層 514 內之碳質材料可與可利用鋰黏結。碳質材料與鋰離子之間的黏結度可經由在製備分級層 514 期間誘導之化學反應來選擇或改變。

【0121】 在一些實行方案中，各種碳同素異形體可摻入分級層 514 內(諸如在錫-鋰合金區域 512 及/或氟化錫層 510 之一或多個部分中)。此等碳同素異形體可用一或多種反應物來官能化且用於在分級層 514 內之碳奈米鑽石與電解質 540 之界面處形成密封劑層及/或區域。在一些態樣中，碳奈米鑽石可增加陽極 502 及/或分級層 514 之機械堅固性。在其他態樣中，碳奈米鑽石亦可提供暴露碳質表面，其可用於藉由以將多硫化物保持在電池的、陽極 502 外部之界定區域內的方式來微觀限定存在於電解質 540 中之多硫化物及/或與其鍵結而減少多硫化物穿梭效應。

【0122】 或者，在其他實行方案中，分級層 514 內之碳奈米鑽石可經替換為包括具有特定 L_A 尺寸(例如，sp^2 雜化碳)之表面及/或區域的碳及/或碳質材料、還原氧化石墨烯(rGO)、及/或石墨烯。在一些態樣中，在電池內使用本文揭示之碳質材料可增加分級層 514 內之碳疊加及層形成。經剝離及氧化碳質材料亦可在分級層 514 內產生更均勻的分層結構(與未經剝離及氧化之碳質材料相比)。在一些態樣中，溶劑諸如四丁基氫氧化銨(TBA)及/或二甲基甲醯胺(DMF)處理可應用於本文揭示之碳質材料以增加分級層 514 內之暴露碳質表面之潤濕。

【0123】 在一些實行方案中，可摻雜用於形成分級層 514 之漿料以改良或以其他方式影響分級層 514 內之碳質材料之晶體結構。例如，添加某些摻雜劑可以某種對應方式影響碳質材料之晶體結構，且可在分級層 514 內(例如，經由接枝於碳質材料內之暴露碳原子上)添加官能基。

【0124】 在一些實行方案中，具有用含氟或含矽官能基中之一或多者來官能化之暴露表面的碳質材料可包括在分級層 514 內。在其他實行方案中，具有用含氟或含矽官能基中之一或多者來官能化之暴露表面的碳質材料可沉積於分級層 514 下方，以在分級層 514 與陽極 502 之間的界面上形成穩定 SEI。在一個實行方案中，穩定 SEI 可替換保護層 516。在一些實行方案中，分級層 514 可使用其他技術來漿料鑄造及/或沉積至具有鋰及碳界面相之陽極 502 上，該等界面相中之任一者可用矽及/或氮來官能化，以抑制多硫化物擴散及遷移至陽極 502 之暴露表面。另外，特定聚合物及/或交聯劑可摻入分級層 514 內，以機械加強分級層 514、改良跨分級層 514 之鋰離子傳輸、或增加跨分級層 514 之鋰離子通量之均勻性。適用於摻入分級層 514 內之示例性聚合物及/或聚合物材料可包括聚(環氧乙烷)及聚(乙烯亞胺)。適用於摻入分級層 514 內之示例性交聯劑可包括無機交聯劑(例如，硼酸鹽、鋁酸鹽、矽酸鹽)、多官能有機分子(例如，二胺、二醇)、聚脲、或高分子量(MW)(例如，>10,000 道爾頓)羧甲基纖維素(CMC)。

【0125】 各種製造方法可用於產生分級層 514。在一個實行方案中，在沉積及/或形成分級層 514 之前，對在陽極 502 與電解質 540 之間的界面之直接塗佈可藉由分散溶解於載劑(例如，溶劑、黏合劑、聚合物)中之碳質材料及其他化學品來執行。在另一個實行方案中，分級層 514 之沉積可作為單獨操作來執行，或可向漿料中添加各種其他活性成分(例如，金屬、碳質材料、氟化錫及/或類似者)，該漿料可經鑄造至陽極 502 上。或者，在另一個實行方案中，保護層 516 可藉由壓延輥層壓過程來直接轉移至陽極 502 上。保護層 516 及/或分級層 514

亦可摻入經部分固化之鋰離子導電環氧樹脂，以例如在壓延輥層壓過程期間更好地增加與鋰之黏附。

【0126】 在一個實行方案中，含碳分層結構(圖 5 中未展示)可安置於陽極 502 上來替換分級層 514。含碳分層結構可包括可用於鋰轉移之原子平面，且可以可引導氟化鋰在電池之各個部分中形成的方式，將由電解質 540 提供之鋰離子均勻傳輸至整個保護層 516。在各個實行方案中，含碳分層結構可包括少層石墨烯(FLG)或石墨之一或多種佈置且/或可嵌入有鋰，且產生一或多種反應產物，包括氧化錫鋰(LTO)、磷酸鐵鋰(LFP)、或鈣鈦礦鈦酸鑭鋰(LLTO)。

【0127】 在一些實行方案中，氟化錫層 510 可充當針對腐蝕之保護層，包括保護層 516、分級層 514、或陽極 502 之含銅表面及/或區域之腐蝕。在一些態樣中，氟化錫層 510 亦可提供適用於鋰沉積之均勻種晶層，且由此抑制枝晶形成。另外，在一些實行方案中，氟化錫層 510 可包括一或多種鋰離子嵌入化合物，其任何一者或多者具有低電壓補償(voltage penalty)。合適鋰離子嵌入化合物可包括石墨碳(例如，石墨、石墨烯、還原氧化石墨烯 rGO)。在一個實行方案中，在製造陽極 502 期間，在鍍敷至氟化錫層 510 內之暴露碳質表面上之前，鋰離子可傾向於嵌入。以此方式，在開始鋰鍍敷及/或電鍍操作之前，氟化錫層 510 具有準備充當種晶層之均勻 Li 分佈。

【0128】 在一個實行方案中，一或多個保形塗層可施加於陽極 502 之部分上，使得所得保形塗層接觸且共形於陽極 502 之第一邊緣 518_1 及/或第二邊緣 518_2。在一些態樣中，保形塗層可作為第一間隔物邊緣保護區域 530_1 及第二間隔物邊緣保護區域 530_2 開始，該等邊緣保護區域與保護層 516、錫-鋰合金區域 512、及/或氟化錫層 510 中之一或多者反應或以其他方式組合，以形成保形塗層 544，該保形塗層至少部分地密封且保護陽極 502 中之鋰與懸浮在電解質中之各種物質(例如，銅(Cu))之間的表面及/或界面。在一些態樣中，氟原子自存在於保形塗

層 544 中之氟化錫之解離可與陽極 502 中之鋰反應，以形成氟化鋰，而非形成或生長成鋰枝晶。以此方式，保形塗層 544 可減少自陽極 502 之鋰枝晶形成或生長。

【0129】 保形塗層 544 可以許多不同厚度來沉積或安置在陽極 502 之上。在一些態樣中，保形塗層 544 可小於 5 μm 厚。在其他態樣中，保形塗層 544 可小於 2 μm 厚。在一些其他態樣中，保形塗層 544 可小於 1 μm 厚。在電池循環期間，此等厚度水準可阻礙多硫化物遷移至陽極 502，由此防止至少一些鋰離子與多硫化物反應。不與多硫化物反應之鋰離子可用於在電池放電循環期間自陽極傳輸至陰極。

【0130】 保形塗層 544(以及保護層 516 及分級層 514)可獨特地調控朝向陽極 502 之第一邊緣 518_1 及/或第二邊緣 518_2 之鋰離子通量，且由此防止陽極 502 之腐蝕。此調控可以與在製造多晶矽(poly-Si)閘極期間所使用之閘極間隔物類似的方式來起作用。具體而言，在製造積體電路(IC)期間，閘極間隔物或閘極側壁構建體可用於保護及機械支撐多晶矽閘極。類似地，藉由保形塗層 544 為圖 5 之陽極 502 提供之邊緣保護調控朝向陽極 502 之第一邊緣 518_1 及/或第二邊緣 518_2 之鋰離子通量，且由此防止陽極 502 之腐蝕。藉由保形塗層 544 為陽極 502 所提供的此種類型之邊緣保護可同樣適用於其他電池及/或電化電池格式及/或組態，諸如(但不限於)圓柱形電池、堆疊電池、及/或類似者，其中各種構建體專門經工程化以適合此類設計中之各者之參數。

【0131】 在一些實行方案中，保形塗層 544、保護層 516、及/或分級層 514 在陽極 502 上之製造及/或沉積可視併入陽極 502 之電池或電池構建體之類型而定，例如，圓柱形電池相較於軟包電池及/或棱柱形電池。在一個實行方案中，對於圓柱形電池，金屬陽極可由電活性材料構成，該等材料通常為金屬鋰及/或含鋰合金，例如包括鋰之石墨及/或其他碳質複合物，以及任何全均勻或多層材料薄片。在一個實例中，用作陽極 502 之固體金屬鋰箔可附接至用作集電器 520

之銅基板，以有利於電子通過接片 546 轉移到外部負載，如圖 5 之實例中所描繪。在其他實行方案中，電池 500 可包括不存在集電器 520 之情況下的陽極 502，其中包含在陽極 502 內之碳質材料可提供與電路耦合之導電介質。

【0132】 在一些實行方案中，陽極結構 500 可藉由圍繞心軸之捲繞來併入電化電池及/或電池中。圓柱形電池佈局通常使用雙面陽極，諸如陽極結構 500。在一些實行方案中，採用陽極結構 500 之圓柱形電池構造可使用保形塗層 544 來保護陽極 502 之第一邊緣 518_1 及/或第二邊緣 518_2。藉由保形塗層 544 提供之均勻保護可在本文中稱為「邊緣保護」。在一個實行方案中，藉由將保護層 516 之大小及/或區域延伸以疊加在陽極之任何幾何誘導邊緣效應(例如表面粗糙度)以外，可將邊緣保護併入使用陽極結構 500 之電池中。

【0133】 在其他實行方案中，陽極結構 500 可併入軟包電池及/或棱柱形電池中。總體上，可製造軟包電池及/或棱柱形電池之兩種構建體，包括(1)：卷芯電池(例如，在行業中作為鋰-聚合物電池存在)，兩個心軸捲繞電極可以與如先前論述之圓柱形電池類似的方式產生；及(2)：堆疊板型電池，其可自預鑄造及/或預層壓製備陽極薄片上切割，使得例如陽極 502 之(當以堆疊板型組態製備時)之未經保護邊緣暴露且易受腐蝕、快速離子通量及暴露於電池中。在堆疊板型組態中，保形塗層 544 可保護陽極 502 且防止電解質 540 中之鋰過度飽和。以此方式，在電池之操作循環期間，保形塗層 544 可控制陽極 502 上之鋰鍍敷。

【0134】 在一些實行方案中，在電池組裝或電池休止期期間，一或多個化學反應可在電解質 540 與陽極 502 之間發生(涉及溶劑分解及/或加成反應)。此等化學反應可有助於產生保形塗層 544。在一些態樣中，較高及/或較低溫度(例如，相對於室溫及/或 20°C)可用作保形塗層 544 之鋰誘導聚合之刺激。例如，鋰誘導聚合可在一或多種催化劑存在下發生及/或藉由使用鋰金屬及其相關化學反應性作為誘導劑來發生，以啟動陽極結構 500 及/或保形塗層 544 中任何一或多個層

內之組成物質的基於自由基之聚合。另外，在正向或反向方向的電偏壓下之電化學反應可用於在陽極 502 上製造及/或沉積保形塗層 544，也可使用輔助金屬及/或鹽作為添加劑，其可分解以在暴露於電解質 540 之陽極 502 中金屬鋰之第一邊緣 518_1 及/或第二邊緣 518_2 上形成合金。例如，合適添加劑可含有一或多種金屬物質，例如，其為與鋰共合金化所需要的或慾用作阻擋層以減少鋰轉移至陽極 502 之第一邊緣 518_1 及/或第二邊緣 518_2。

【0135】 圖 6 展示根據一些實行方案的圖 5 之陽極結構 500 之放大部分 600 的示意圖。放大部分 600 繪示第一間隔物邊緣保護區域 530_1 及第二間隔物邊緣保護區域 530_2(圖 6 中統稱為邊緣保護區域 530)在與第一邊緣 518_1 及/或第二邊緣 518_2 正交之方向中之排佈，如圖 5 所示。因此，可包括經組織成結構及/或晶格之碳質材料 610 之邊緣保護區域 530 可阻止鋰離子不期望地跨邊緣保護區域 530 逸出陽極 502。以此方式，鋰離子解離、通量、傳輸、及/或其他移動可在圖 6 之整個放大部分 600(以及圖 5 之陽極結構 500)中被有效地引導，由此產生最佳電池操作循環。在一些實行方案中，用於產生邊緣保護區域之碳質材料 610 可包括少層石墨烯(FLG)、多層石墨烯(MLG)、石墨、碳奈米管(CNT)、碳奈米洋蔥(CNO)及/或類似者。碳質材料 610(例如，圖 8A、圖 8B、圖 9A、圖 9B、圖 10A 及/或圖 10B 中展示)可以不同濃度水準來合成、自身成核、或以其他方式接合在一起，以提供邊緣保護區域 530 之完全可調諧性。例如，與保護層 516 或分級層 514 相比，密度、厚度、及/或組成可經設計以使鋰離子滲透最小化，以相應地引導鋰離子滲透。在一些實行方案中，邊緣保護區域 530 可小於 5 μm 厚。在其他態樣中，邊緣保護區域 530 可小於 2 μm 厚。在一些其他態樣中，邊緣保護區域 530 可小於 1 μm 厚。在一些實行方案中，與黏合劑 620 一樣，導電添加劑 640 可添加至碳質材料 610。

【0136】 圖 7 展示根據一些實行方案之聚合物網路 710 之圖。在一些態樣中，

聚合物網路 710 可為圖 2 之聚合物網路 285 之一個實例。聚合物網路 710 可安置在陽極 702 上。陽極 702 可形成為鹼金屬層，其具有包括許多含有鹼金屬之奈米結構或微觀結構的一或多個暴露表面。鹼金屬可包括(但不限於)鋰、鈉、鋅、銦及/或鎵。在電池之操作循環期間，陽極 702 可釋放鹼金屬離子。

【0137】 碳質材料層 714 可用氟化聚合物鏈接枝且沉積在陽極 702 之一或多個暴露表面之上。接枝可基於(例如，開始於)用一或多種自由基引發劑，例如過氧化苯甲醯(BPO)或偶氮二異丁腈(AIBN)來活化碳質材料，隨後與單體分子反應。聚合物網路 710 可基於彼此交聯之氟化聚合物鏈及層 714 之碳質材料，使得在產生聚合物網路 710 期間層 714 被消耗。在一些實行方案中，聚合物網路 710 可具有大約 0.001 μm 與 5 μm 之間的厚度且包括大約 0.001 重量%至 2 重量%之間的氟化聚合物鏈。在一些其他實行方案中，聚合物網路 710 可包括大約 5 重量%至 100 重量%之間的用氟化聚合物鏈接枝之複數種碳質材料且其餘為氟化聚合物、或一或多種非氟化聚合物、或一或多種可交聯單體、或其組合。在一個實行方案中，用氟化聚合物鏈接枝之碳質材料可包括 5 重量%至 50 重量%之氟化聚合物鏈且其餘為碳質材料。

【0138】 在電池循環期間，聚合物網路 710 內之碳-氟鍵可與新形成之鋰金屬發生化學反應且轉化成碳-鋰鍵(C-Li)。此等 C-Li 鍵可進而經由伍茲反應 750 與聚合物網路 710 內之碳-氟鍵反應，以藉由新形成之 C-C 鍵使聚合物網路進一步交聯且形成含有鹼金屬之氟化物(諸如氟化鋰(LiF))。導致均勻形成含有鹼金屬之氟化物的額外聚合物網路交聯可由此抑制與陽極 702 相關之鹼金屬枝晶形成 740，由此改良電池性能及壽命。在一個實行方案中，將氟化甲基/丙烯酸酯(FMA)接枝至層 714 中之碳質材料之一或多個暴露石墨烯表面可在有機溶液中執行，例如導致形成石墨烯-接枝-聚-FMA 及/或類似者。將碳-氟鍵摻入於暴露石墨烯表面上可使得能夠在碳-氟鍵與由陽極 702 提供的鹼金屬(例如，鋰)之金屬表面

之間發生伍茲反應 750。以此方式，完成伍茲反應 750 可導致形成聚合物網路 710。在一些態樣中，聚合物網路 710 可包括在完成伍茲反應 750 之後的密度梯度 716。密度梯度 716 可包括互連石墨烯薄片且可灌注有一或多種原位形成之金屬氟化物鹽。另外，層孔隙率及/或機械性質可藉由碳負載及/或官能化碳之組合來調諧，該等官能化碳各自具有獨特及/或不同物理結構。

【0139】 在一些實行方案中，密度梯度 716 內之碳質材料可包括平坦石墨烯、起皺石墨烯、複數個碳奈米管(CNT)、或複數個碳奈米洋蔥(CNO)中之一或多者(例如，如圖 8A 及/圖 8B 描繪且如圖 9A-9B 及圖 10A-10B 之顯微照片展示)。在一個實行方案中，石墨烯奈米片可分散在整個聚合物網路 710 內且彼此隔離。石墨烯奈米片之分散包括一或多個不同濃度水準。在一個實行方案中，石墨烯奈米片之分散可包括用至少一些氟化聚合物鏈來官能化之至少一些碳質材料。

【0140】 例如，氟化聚合物鏈可包括一或多種丙烯酸酯或甲基丙烯酸酯單體，包括丙烯酸 2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7-十二氟庚酯(DFHA)、甲基丙烯酸 3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-十七氟癸酯(HDFDMA)、甲基丙烯酸 2,2,3,3,4,4,5,5-八氟戊酯(OFPMA)、甲基丙烯酸四氟丙酯(TFPM)、3-[3,3,3-三氟-2-羥基-2-(三氟甲基)丙基]雙環[2.2.1]庚-2-基甲基丙烯酸酯(HFA 單體)、或基於乙烯基之單體(包括 2,3,4,5,6-五氟苯乙烯(PFSt))。

【0141】 在一些實行方案中，氟化聚合物鏈可接枝至碳質材料層之表面且可由此經由伍茲反應 750 與陽極之鹼金屬之一或多個表面發生化學相互作用。在有機化學、有機金屬化學、及無機主族聚合物中，伍茲反應為偶合反應，其中兩種烷基鹵化物與乾醚溶液中之金屬鈉(或某種其他金屬)反應，以形成更高級烷烴。在此反應中，用乾醚(不含水分)溶液中之鹼金屬(例如，金屬鈉)處理烷基鹵化物，以產生更高級烷烴。在鈉的情況下，伍茲反應之中間產物為高極性及高反應性碳-鈉金屬鍵，其進而與碳-鹵鍵發生化學反應，以產生新形成之 C-C 鍵及

鹵化鈉。形成新碳-碳鍵允許使用伍茲反應製備含有偶數碳原子之更高級烷烴，例如：

$$2\ R{-}X + 2\ Na \rightarrow R{-}R + 2\ Na^{+}X^{-} \qquad \text{(等式 1)}$$

【0142】 其他金屬亦用於影響伍茲偶合，尤其是銀、鋅、鐵、活化銅、錒以及氯化錳與氯化銅之混合物。處理芳基鹵化物之相關反應稱為伍茲－菲提希反應(Wurtz–Fittig reaction)。此可藉由形成自由基中間物及其隨後歧化作用以給出烯烴來解釋。伍茲反應 750 透過使得產生烯烴產物之副反應成為可能的自由基機制來發生。在一些實行方案中，與如上所述之伍茲反應相關之化學相互作用可形成鹼金屬氟化物，例如氟化鋰。

【0143】 在一個實行方案中，聚合物網路 710 可包括與陽極 702 接觸之界面層 718。保護層 720 可安置於界面層 718 之頂部，其可基於陽極 702 與聚合物網路 710 之間的界面處之伍茲反應 750。界面層 718 可具有相對高交聯密度(例如，氟化聚合物及/或類似者)、高金屬-氟化物濃度、及相對低碳-氟鍵濃度。與界面層 718 相比，保護層 720 可具有相對低交聯密度、低金屬-氟化物濃度、及高碳-氟鍵濃度。

【0144】 在一些實行方案中，界面層 718 可包括可交聯單體，諸如甲基丙烯酸酯(MA)、丙烯酸酯、乙烯基官能基、或環氧官能基與胺官能基之組合。在一個實行方案中，保護層 720 可藉由密度梯度 716 來表徵。以此方式，密度梯度 716 可與保護層 720 之一或多個自我修復性質相關且/或可加強聚合物網路 710。在一些實行方案中，在電池循環期間，保護層 720 可進一步抑制自陽極 702 之鹼金屬枝晶形成 740。

【0145】 在操作上，界面層 718 可藉由在跨陽極 702 之長度之界面處均勻產生金屬氟化物(例如氟化鋰)來抑制與陽極 702 相關之鹼金屬枝晶形成 740。均勻產生金屬氟化物，例如經由轉化成金屬氟化物，導致枝晶表面溶解，最終抑制

鹼金屬枝晶形成 740。另外，在其餘枝晶上氟化聚合物鏈之交聯可進一步抑制鹼金屬枝晶形成 740。在一些實行方案中，密度梯度 716 可經調諧以控制氟化聚合物鏈之間的交聯度。

【0146】 圖 8A 展示根據一些實行方案之具有分級孔隙率之示例性碳質顆粒 800 的簡化剖視圖。碳質顆粒 800 可在反應器中合成，且以受控方式輸出，以產生圖 1 之陰極 110 及/或陽極 120、圖 2 之陰極 210 及/或陽極 220 或圖 3 之電極 300。亦可稱為標的組合物之碳質顆粒 800 包括彼此嵌套之複數個區域。各區域可包括至少第一孔隙率區域 811 及第二孔隙率區域 812。第一孔隙率區域 811 可包括複數個第一孔隙 801，且第二孔隙率區域 812 可包括複數個第二孔隙 802。在一些態樣中，各區域可藉由至少一些第一孔隙 801 來與直接相鄰區域隔開。第一孔隙 801 可分散在碳質顆粒 800 之整個第一孔隙率區域 811 中，且第二孔隙 802 可分散在碳質顆粒 800 之整個第二孔隙率區域 812 中。以此方式，第一孔隙 801 可與第一孔隙密度相關，且第二孔隙 802 可與不同於第一孔隙密度之第二孔隙密度相關。在一些態樣中，第一孔隙密度可在大約 0.0 立方公分(cc)/g 與 2.0 cc/g 之間，且第二孔隙密度可在大約 1.5 與 5.0 cc/g 之間。在一些態樣中，第一孔隙 801 可經組態以保持多硫化物 820，且第二孔隙 802 可提供自碳質顆粒 800 中之離開通道。

【0147】 一組碳質顆粒 800 可接合在一起以形成碳質聚集物(為簡單起見未展示)，且一組碳質聚集物可接合在一起以形成碳質團聚物(為簡單起見未展示)。在一些實行方案中，第一孔隙 801 及第二孔隙 802 可分散在藉由相應組之碳質顆粒 800 來形成之整個聚集物中。在一些態樣中，第一孔隙率區域 811 可至少部分地由第二孔隙率區域 812 封裝，以使得相應團聚物可包括一些第一孔隙 801 及/或一些第二孔隙 802。

【0148】 在一些實行方案中，碳質顆粒 800 可具有 20 nm 與 150 nm 之間的近

似範圍中之主要尺寸「A」，藉由一組碳質顆粒 800 形成之聚集物可具有 20 nm 與 10 μm 之間的近似範圍中之主要尺寸，且藉由一組聚集物形成之團聚物可具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的近似範圍中之主要尺寸。在一些態樣中，至少一些第一孔隙 801 及第二孔隙 802 具有 1.3 nm 與 32.3 nm 之間的近似範圍中之主要尺寸。在一個實行方案中，各第一孔隙 801 具有 0 nm 與 100 nm 之間的近似範圍中之主要尺寸。

【0149】 碳質顆粒 800 亦可包括沿著碳質顆粒 800 之周邊 810 分佈之複數個可變形區域 813。碳質顆粒 800 可沿著具有一或多個其他碳質顆粒之接合邊界(諸如周邊 810)來導電。碳質顆粒 800 亦可限定多硫化物 820 於第一孔隙 801 內及/或一或多個阻擋區域 822 處，由此抑制多硫化物 820 遷移至陽極且增加鋰離子可自主電池之陽極傳輸至陰極的速率。

【0150】 在一些實行方案中，碳質顆粒 800 可具有 10 m^2/g 至 3,000 m^2/g 之間的近似範圍內之暴露碳表面的表面積。在其他實行方案中，碳質顆粒 800 可具有複合表面積，包括微觀限定於許多第一孔隙 801 及/或許多第二孔隙 802 內之硫 824。如本文所用，微觀限定多硫化物 820 之第一孔隙 801 及/或第二孔隙 802 可稱為「功能性孔隙」。在一些態樣中，碳質顆粒、由對應組之碳質顆粒形成之聚集物、或由對應組之聚集物形成之團聚物中之一或多者可包括經組態以使硫 824 成核的一或多個暴露碳表面。複合表面積可在大約 10 m^2/g 至 3,000 m^2/g 之間的範圍內，且碳質顆粒 800 可具有大約 1:5 至 10:1 之間的硫與碳重量比。在一些態樣中，碳質顆粒 800 可在 12,000 鎊/平方吋(psi)之壓力下具有 100 S/m 至 20,000 S/m 之間的近似範圍內之電導率。

【0151】 在一些實行方案中，碳質顆粒 800 可包括界面活性劑或聚合物，包括苯乙烯丁二烯橡膠、聚偏二氟乙烯、聚丙烯酸、羧基甲基纖維素、聚乙烯基吡咯啶酮、及/或聚乙酸乙烯酯中之一或多者，其可充當將一組碳質顆粒 800 接

合在一起之黏合劑。在其他實行方案中，碳質顆粒 800 可包括安置在至少一些第一孔隙 801 或第二孔隙 802 內之凝膠相電解質或固相電解質。

【0152】 圖 8B 展示根據一些實行方案之三區段顆粒 850 之實例的圖。在各個實行方案中，三區段顆粒 850 可為圖 8A 之碳質顆粒 800 之一個實例。三區段顆粒 850 可包括三個離散區段，諸如(但不限於)第一區段 851、第二區段 852、及第三區段 853。在一些態樣中，區段 851–853 中之各者包圍且/或封裝前一個區段。例如，第一區段 851 可由第二區段 852 包圍或封裝，且第二區段 852 可由第三區段 853 包圍或封裝。第一區段 851 可對應於三區段顆粒 850 之內部區域，第二區段 852 可對應於三區段顆粒 850 之中間過渡區域，且第三區段 853 可對應於三區段顆粒 850 之外部區域。在一些態樣中，三區段顆粒 850 可包括響應於與一或多個相鄰非三區段顆粒及/或三區段顆粒 850 接觸而變形之滲透性殼 855。

【0153】 在一些實行方案中，第一區段 851 可具有相對低密度、相對低電導率、及相對高孔隙率，第二區段 852 可具有中等密度、中等電導率、及中等孔隙率，且第三區段 853 可具有相對高密度、相對高電導率、及相對低孔隙率。在一些態樣中，第一區段 851 可具有大約 1.5 g/cc 與 5.0 g/cc 之間的碳質材料密度，第二區段 852 可具有大約 0.5 g/cc 與 3.0 g/cc 之間的碳質材料密度，且第三區段 853 可具有大約 0.0 與 1.5 g/cc 之間的碳質材料密度。在其他態樣中，第一區段 851 可包括寬度在大約 0 與 40 nm 之間的孔隙，第二區段 852 可包括寬度在大約 0 與 35 nm 之間的孔隙，且第三區段 853 可包括寬度在大約 0 與 30 nm 之間的孔隙。在一些其他實行方案中，對於三區段顆粒 850 而言，第二區段 852 可不加以界定。在一個實行方案中，第一區段 851 可具有大約 0 nm 與 100 nm 之間的主要尺寸 D_1，第二區段 852 可具有大約 20 nm 與 150 nm 之間的主要尺寸 D_2，且第三區段 853 可具有大約 200 nm 之主要尺寸 D_3。

【0154】 本揭示案之態樣認識到，三區段顆粒 850 之獨特佈局以及第一區段

851、第二區段 852、及第三區段 853 之相對尺寸、孔隙率、及電導率可經選擇及/或修改以在使多硫化物穿梭效應最小化與使主電池之比容量最大化之間達成所需平衡。具體而言，在一些態樣中，在一個區段與另一個區段之間，孔隙可在大小及體積上減小。在一些實行方案中，三區段顆粒可完全由具有一系列孔徑及孔隙分佈(例如，孔隙密度)的一個區段組成。對於圖 8B 之實例，與第一區段 851 或第一孔隙率區域相關之孔隙 861 具有相對較大寬度且可經定義為大孔，與第二區段 852 或第二孔隙率區域相關之孔隙 862 具有中等大小寬度且可經定義為中孔，且與第三區段 853 或第三孔隙率區域相關之孔隙 863 具有相對較小寬度且可經定義為微孔。

【0155】 一組三區段顆粒 850 可接合在一起以形成聚集物(為簡單起見未展示)，且一組聚集物可接合在一起以形成團聚物(為簡單起見未展示)。在一些實行方案中，複數個中孔可散佈在由相應組之碳質顆粒 800 形成之整個聚集物中。在一些態樣中，第一孔隙率區域 811 可至少部分地由第二孔隙率區域 812 封裝，以使得相應聚集物可包括一或多個中孔及一或多個大孔。在一個實行方案中，各中孔可具有 3.3 奈米(nm)與 19.3 nm 之間的主要尺寸，且各大孔可具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的主要尺寸。在一些情況下，三區段顆粒 850 可包括彼此交織在一起且藉由至少一些中孔來彼此隔開的碳片段。

【0156】 在一些實行方案中，三區段顆粒 850 可包括界面活性劑或聚合物，包括苯乙烯丁二烯橡膠、聚偏二氟乙烯、聚丙烯酸、羧基甲基纖維素、聚乙烯基吡咯啶酮、及/或聚乙酸乙烯酯中之一或多者，其可充當將一組碳質材料接合在一起之黏合劑。在其他實行方案中，三區段顆粒 850 可包括安置在至少一些孔隙內之凝膠相電解質或固相電解質。

【0157】 在一些實行方案中，三區段顆粒 850 可具有 10 m^2/g 至 3,000 m^2/g 之間的近似範圍內之暴露碳質表面之表面積及/或 10 m^2/g 至 3,000 m^2/g 之間的近似

範圍內之複合表面積(包括微觀限定於孔隙內之硫)。在一個實行方案中，包括許多三區段顆粒850之標的組合物可具有在12,000鎊/平方吋(psi)之壓力下100 S/m至20,000 S/m之間的近似範圍內之電導率及大約1:5至10:1之間的硫與碳重量比。

【0158】 圖8C展示代表根據一些實行方案之圖8B之三區段顆粒850的各區域中之平均孔隙體積的示例性階梯函數800C。正如所論述，分佈於整個三區段顆粒850中之孔隙可具有不同大小、體積、或分佈。在一些實行方案中，平均孔隙體積可基於三區段顆粒850之中心與相鄰區段之間的距離而減小，例如使得與第一區段851或第一孔隙率區域相關之孔隙具有相對較大體積或孔徑，與第二區段852或第二孔隙率區域相關之孔隙具有中等體積，且與第三區段853或第三孔隙率區域相關之孔隙具有相對小體積。與接近周邊之區域相比，內部區域具有更高孔隙體積。具有更高孔隙體積之區域提供較高硫負載，而較低孔隙體積外部區域減輕在電池循環期間多硫化物之遷移。在圖8C之實例中，內部區域中之平均孔隙體積為大約3 cc/g，最外面區域中之平均孔隙體積為-0.5 cc/g，且中間區域中之平均孔隙體積為0.5 cc/g與3 cc/g之間。

【0159】 圖8D展示描繪本文所述的碳質顆粒之孔隙體積與孔隙寬度關係之示例性分佈的圖表800D。如圖表800D所描繪，與相對較高孔隙體積相關之孔隙可具有相對較低孔隙寬度，例如，使得當孔隙體積減少時，孔隙寬度總體增加。在一些態樣中，具有小於大約1.0 nm之孔隙寬度之孔隙可稱為微孔，具有大約3與11 nm之間的孔隙寬度之孔隙可稱為中孔，且具有大於大約24 nm之孔隙寬度之孔隙可稱為大孔。

【0160】 圖9A展示根據一些實行方案之複數個碳質結構902之顯微照片900。在一些實行方案中，碳質結構902中之各者可具有基本上中空之核心區域，其由各種整體碳生長及/或分層來包圍。在一些態樣中，整體碳生長及/或分層可

為參考圖 8A 及 8B 所描述之整體碳生長及/或分層之實例。在一些情況下，碳質結構 902 可包括以不同密度及/或濃度水準來組織之多個同心多層富勒烯及/或類似地成形碳質結構。例如，碳質結構 902 中之各者之實際最終形狀、大小、及石墨烯組態可視各種製造方法而定。在一些態樣中，碳質結構 902 可表現出較差水溶性。因此，在一些實行方案中，非共價官能化可用於改變碳質結構 902 之一或多種分散性性質而不會影響底層碳奈米材料之內在性質。在一些態樣中，底層碳奈米材料可為構成性 sp^2 碳奈米材料。在一些實行方案中，碳質結構 902 中之各者可具有大約 20 與 500 nm 之間的直徑。在各個實行方案中，各組碳質結構 902 可聚結及/或接合在一起以形成聚集物 904。另外，各組聚集物 904 可聚結及/或接合在一起以形成團聚物 906。在一些態樣中，碳質結構 902、聚集物 904、及/或團聚物 906 中之一或多者可用於形成圖 1 之電池 100、圖 2 之電池 200、或圖 3 之電極 300 之陽極及/或陰極。

【0161】 圖 9B 展示根據一些實行方案之由碳質材料形成之聚集物的顯微照片 950。在一些實行方案中，聚集物 960 可為圖 9A 之聚集物 904 中之一者的實例。在一個實行方案中，外部碳質殼型結構 952 可與藉由其他碳質殼型結構 954 提供之碳融合在一起以形成碳質結構 956。一組碳質結構 956 可彼此聚結及/或接合以形成聚集物 1010。在一些態樣中，碳質結構 956 中之各者之核心區域 958 可為可調的，例如，因為核心區域 958 可包括各種界定濃度水準之互連石墨烯結構，如參考圖 8A 及/或圖 8B 所描述。在一些實行方案中，一些碳質結構 956 可在外部碳質殼型結構 952 處或附近具有大約 0.1 g/cc 與 2.3 g/cc 之間的第一濃度之互連碳。碳質結構 956 中之各者可具有將向內延伸之鋰離子傳輸至核心區域 1008 的孔隙。

【0162】 在一些實行方案中，碳質結構 956 中之各者中之孔隙可具有大約 0.0 nm 與 0.5 nm 之間、大約 0.0 與 0.1 nm 之間、大約 0.0 與 6.0 nm 之間、或大約 0.0

與 35 nm 之間的寬度或尺寸。各碳質結構 956 亦可在核心區域 958 處或附近具有不同於第一濃度之第二濃度。例如，第二濃度可包括經同心佈置之多個相對較低密度碳質區域。在一個實行方案中，第二濃度可低於第一濃度，在大約 0.0 g/cc 與 1.0 g/cc 之間或在大約 1.0 g/cc 與 1.5 g/cc 之間。在一些態樣中，第一濃度及第二濃度之間的關係可用於在將硫或多硫化物限定在相應電極內與使鋰離子之傳輸最大化之間達成平衡。例如，在鋰硫電池之操作循環期間，硫及/或多硫化物可行進穿過第一濃度且至少暫時限定於及/或散佈於整個第二濃度中。

【0163】 在一些實行方案中，至少一些碳質結構 956 可包括經組織為整體及/或互連生長且在熱反應器中產生的 CNO 氧化物。例如，碳質結構 956 可根據以下實例配方用鈷奈米顆粒來修飾：乙酸鈷(II)($C_4H_6CoO_4$)，乙酸之鈷鹽(通常以四水合物 $Co(CH_3CO_2)_2 \cdot 4\,H_2O$ 形式存在，其可縮寫為 $Co(OAc)_2 \cdot 4\,H_2O$，其可以對應於 40.40 重量%碳(係指呈 CNO 形式之碳)的大約 59.60 重量%之比率流動至熱反應器中，導致 CNO 氧化物上之活性位點用鈷官能化，相應地展示在 15,000x 水準下之經鈷修飾 CNO。在一些實行方案中，用於產生碳#29 及/或經鈷修飾 CNO 之合適氣體混合物可包括以下步驟：

- 0.75 標準立方公尺/分鐘(scfm)之 Ar 吹掃持續 30 min；
- 改變至 0.25 scfm 之 Ar 吹掃以進行運行；
- 溫度增加：25°C至 300°C 20 min；及
- 溫度增加：300° – 500°C 15 min。

【0164】 參考圖 9A 及 9B 所描述之碳質材料可包括石墨烯之一或多個實例或以其他方式由其形成，其可包括碳原子單層，其中各原子在蜂窩結構中結合至三個相鄰原子。單層可為限於一維度之鬆散材料，諸如在凝聚相內或表面處。例如，石墨烯可僅在 x 及 y 平面(而不在 z 平面)中向外生長。以此方式，石墨烯可為二維(2D)材料，包括一或多個層，其中各層中之原子強烈鍵結至(諸如藉由

複數個碳-碳鍵)同一層中之相鄰原子。

【0165】 在一些實行方案中，石墨烯奈米片(例如，包括在各碳質結構 956 中之構成性結構)可包括石墨烯之多個實例，諸如第一石墨烯層、第二石墨烯層、及第三石墨烯層，其全部在垂直方向上彼此堆疊在一起。可稱為 GNP 之石墨烯奈米片中之各者可具有 1 nm 與 3 nm 之間的厚度，且可具有在大約 100 nm 至 100 μm 範圍內之橫向尺寸。在一些實行方案中，石墨烯奈米片可使用依序佈置之多個電漿噴鍍槍藉由輥對輥(R2R)生產來產生。在一些態樣中，R2R 生產可包括在經加工為捲曲薄片之連續基板上沉積，包括將 2D 材料轉移至單獨基板。在一些情況下，R2R 生產可用於形成圖 3 之電極 300 之第一薄膜 310 及/或第二薄膜 320，例如使得第一薄膜 310 內之第一聚集物 312 的濃度水準不同於第二薄膜 320 內之第二聚集物 322 的濃度水準。亦即，用於 R2R 製程中之電漿噴鍍槍可噴霧不同濃度水準之碳質材料，以使用特定濃度水準之石墨烯奈米片來產生第一薄膜 310 及/或第二薄膜 320。因此，R2R 製程可為圖 1 之電池 100 及/或圖 2 之電池 200 提供精細可調諧性水準。

【0166】 圖 10A 及 10B 展示根據一些實行方案之用二氧化碳(CO_2)處理之碳質顆粒的相應透射電子顯微鏡(TEM)影像 1000 及 1050。圖 10A 及 10B 中所展示之碳質顆粒可包括石墨烯之一或多個實例或以其他方式由其形成，其可包括單層碳原子，其中各原子在蜂窩結構中結合至三個相鄰原子。

【0167】 圖 11 展示描繪根據一些實行方案之各種碳質聚集物之碳孔隙率類型的圖 1100。在各個實行方案中，參考圖 11 描述之碳質聚集物可為圖 9A 之聚集物 904 及/或圖 9B 之碳質結構 956 的實例。在一些態樣中，參考圖 11 描述之碳質聚集物可用於形成圖 3 之電極 300。正如所論述，聚集物可由一組碳質結構形成或可包括一組碳質結構，例如圖 9A 之碳質結構 902 或圖 9B 之碳質結構 956。在一些態樣中，碳質結構可為 CNO。

【0168】 碳質結構可用於形成具有圖 1100 中展示之任何孔隙率類型的電極(諸如圖 3 之電極 300)。例如，電極可包括孔隙率 1 型 1110、孔隙率 II 型 1120、及孔隙率 III 型 1130 中之任一者。在一些實行方案中，孔隙率 1 型 1110 可包括第一孔隙 1111、第二孔隙 1112、及第三孔隙 1113，其全部用小於 5 nm 之主要尺寸來設定大小以保持多硫化物於電極內。一些多硫化物在形成較大錯合物後尺寸可生長，且變得固定不動地滯留於孔隙率 I 型 1110 之孔隙內。在一些實行方案中，聚集物可接合在一起以產生孔隙率 II 型 1120 及/或孔隙率 III 型 1130 之孔隙，其可保持更大多硫化物及/或多硫化物錯合物。

【0169】 圖 12 展示描繪根據一些實行方案之示例性電極之孔徑與孔隙分佈關係的圖表 1200。如本文所用，「碳 1」係指主要包括微孔(諸如在主要尺寸方面小於 5 nm)的結構化碳質材料，且「碳 2」係指主要包括中孔(諸如在主要尺寸方面在大約 20 nm 至 50 nm 之間)的結構化碳質材料。在一些實行方案中，適用於本文揭示之電池中之一者中的電極可經製備成具有圖表 1200 中描繪之孔徑與孔隙分佈關係。

【0170】 圖 13 展示描繪根據一些實行方案之按照循環數之電池性能的第一圖表 1300 及第二圖表 1310。具體而言，第一圖表 1300 展示相對於使用習知電解質之習知電池之比放電容量，使用本文揭示之電解質 1302 之示例性電池的比放電容量。第二圖表展示相對於使用習知電解質之電池之容量保持能力，使用電解質 1302 之電池的容量保持能力。在一些態樣中，電解質 1302 可為圖 1 之電解質 130 或圖 2 之電解質 230 的一個實例。在第一圖表 1300 及第二圖表 1310 中，習知電解質經製備為具有 2 重量% $LiNO_3$ 之於 DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 = 1:1:1)中之 1 M LiTFSI。

【0171】 圖 14 展示根據一些實行方案之按照循環數之電池性能的條形圖 1400。具體而言，條形圖 1400 描繪相對於使用習知電解質之習知電池之按照循

環數之比放電容量，使用本文揭示之電解質 1402 之示例性電池的按照循環數之比放電容量。在一些態樣中，電解質 1402 可為圖 1 之電解質 130 或圖 2 之電解質 230 的一個實例。在條形圖 1400 中，習知電解質經製備為於 DME:DOL:TEGDME(體積:體積:體積= 1:1:1)中之 1M LiTFSI。條形圖 1400 展示，與使用習知電解質之電池相比，在示例性電池(諸如圖 1 之電池 100 或圖 2 之電池 200)中使用電解質 1402 可將電池之比放電容量在第 3 循環數下增加大約 28%，在第 50 循環數下增加大約 30%，且在第 60 循環數下增加大約 39%。

【0172】 圖 15 展示描繪根據一些實行方案之按照循環數之電池性能的第一圖表 1500 及第二圖表 1510。具體而言，第一圖表 1500 展示相對於使用習知電解質之示例性鋰硫紐扣電池的按照循環數之電極放電容量，使用本文揭示之電解質 1502 之示例性鋰硫紐扣電池的按照循環數之電極放電容量，且第二圖表 1510 展示相對於使用習知電解質之鋰硫紐扣電池的按照循環數之電極放電容量，使用電解質 1502 之鋰硫紐扣電池的按照循環數之容量保持能力。在一些態樣中，電解質 1502 可為圖 1 之電解質 130 或圖 2 之電解質 230 的一個實例。鋰硫紐扣電池在 1C(諸如在一小時內完全放電)之放電速率下、在 100%放電深度(DOD)下循環且保持在大約室溫(68°F或 20°C)下。習知電解質經製備為具有 2 重量% $LiNO_3$ 之於 DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 = 1:1:1)中之 1 M LiTFSI。

【0173】 圖 16 展示描繪根據一些實行方案之按照循環數之電極放電容量的圖表 1600。具體而言，圖表 1600 描繪相對於使用習知電解質之習知電池之電極放電容量，使用本文揭示之電解質 1602 之示例性電池的按照循環數之電極放電容量。在一些態樣中，電解質 1602 可為圖 1 之電解質 130 或圖 2 之電解質 230 的一個實例。習知電解質經製備為具有 2 重量% $LiNO_3$ 之於 DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 = 1:1:1)中之 1 M LiTFSI，且電解質 1602 經製備為具有 2 重量% $LiNO_3$ 之於 DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 = 58:29:13)中之 1 M LiTFSI。

【0174】 圖17展示描繪根據一些實行方案之按照循環數之電極放電容量的另一圖表1700。具體而言，圖表1700描繪相對於使用習知電解質及溶劑套裝之習知電池之電極放電容量，使用本文揭示之電解質1702及溶劑套裝1704之示例性電池的按照循環數之電極放電容量。習知電解質經製備為具有約2重量% $LiNO_3$之於DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 = 1:1:1)中之1 M LiTFSI，且電解質1702經製備為具有2重量% $LiNO_3$之於DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 = 58:29:13)中之1 M LiTFSI。習知溶劑套裝經製備為於DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 = 1:1:1)中之1 M LiTFSI，且溶劑套裝1704經製備為於DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 = 58:29:13)中之1 M LiTFSI。

【0175】 圖18展示描繪根據一些實行方案之各種含有TBT之電解質混合物的按照循環數之比放電容量的圖表1800。如圖表1800展示，「181」指示沒有任何TBT添加之電解質，導致0 M TBT濃度水準，「181-25TBT」指示以25 M TBT濃度水準來製備之電解質，依此類推等等。在一些實行方案中，相對於沒有任何TBT添加之電解質，5 M TBT濃度水準可導致近似70 mAh/g放電容量增加。

【0176】 圖19展示根據一些實行方案之描繪按照循環數之電極放電容量的第一圖表1900及描繪按照循環數之電極容量保持能力的第二圖表1910。具體而言，第一圖表1900描繪相對於不包括本文揭示之保護性晶格之示例性電池的電極放電容量，包括本文揭示之保護性晶格之示例性電池的按照循環數之電極放電容量。第二圖表1910描繪相對於不包括本文揭示之保護性晶格之示例性電池的電極容量保持能力，包括本文揭示之保護性晶格之示例性電池的按照循環數之電極容量保持能力。在一些態樣中，保護性晶格可為圖4之保護性晶格402之一個實例。第一圖表1900及第二圖表1910之性能結果包括使用經製備為具有2重量% $LiNO_3$之於DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 = 58:29:13)中之1 M

LiTFSI的電解質。

【0177】 圖20展示根據其他實行方案之描繪按照循環數之電極放電容量的第一圖表 2000 及描繪按照循環數之電極容量保持能力的第二圖表 2010。具體而言，第一圖表2000描繪了包括圖 7之聚合物網路之示例性電池的按照循環數之電極放電容量。第二圖表2010描繪了包括圖 7之聚合物網路之示例性電池的按照循環數之放電容量保持能力。電池可為圖 1之電池 100或圖 2之電池 200之一個實例。第一圖表 2000 及第二圖表 2010 之性能結果包括使用經製備為具有 2重量% $LiNO_3$之於 DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 = 58:29:13)中之 1 M LiTFSI的電解質。

【0178】 圖21展示根據一些其他實行方案之描繪按照循環數之電極放電容量的第一圖表2100及描繪按照循環數之電極容量保持能力的第二圖表2110。具體而言，第一圖表2100描繪了包括圖 5之保護層 516之示例性電池的按照循環數之電極放電容量。第二圖表2110描繪了包括圖 5之保護層 516之示例性電池的按照循環數之放電容量保持能力。電池可為圖 1之電池 100或圖 2之電池 200之一個實例。第一圖表1900及第二圖表1910之性能結果包括使用經製備為具有2重量% $LiNO_3$之於 DME:DOL:TEGDME (體積:體積:體積 = 58:29:13)中之 1 M LiTFSI的電解質。

【0179】 圖22展示根據一些實行方案之具有主體2201及寬度2205之示例性陰極2200。在一些實行方案中，陰極2200可為圖3之電極300之一個實例。陰極 2200可在許多方面類似於圖 3之電極 300，使得相同元件之描述在此不予以重複。在一個實行方案中，陰極2200包括第一多孔碳質區域2210及與第一多孔碳質區域 2210相鄰定位之第二多孔碳質區域2220。第一多孔碳質區域2210可由第一濃度水準之碳質材料形成，且第二多孔碳質區域2220由與第一濃度水準之碳質材料不同的第二濃度水準之碳質材料形成。例如，第二多孔碳質區域2220

可具有比第一多孔碳質區域 2210 更低濃度水準之碳質材料，如圖 22 展示。在一些態樣中，額外多孔碳質區域(為簡單起見，圖 22 中未展示)可與至少第二多孔碳質區域耦合。

【0180】 具體而言，此等額外多孔碳質區域可在遠離第一多孔碳質區域 2210 之方向上、以碳質材料之濃度水準逐步降低之次序來佈置以提供完全離子傳輸及電流可調諧性。亦即，在一個實行方案中，第二多孔碳質區域 2220 可面向本體電解質(例如，以液相來提供)，且陰極 2200 之第一多孔碳質區域 2210 可與集電器(為簡單起見，圖 22 中未展示)耦合。以此方式，相對於習知鋰離子電池，更緻密碳質區域(諸如第一多孔碳質區域 2210)可在碳質材料之相鄰接觸點之間有利於更高電導水準(圖 22 中展示為「e^-」)，而更稀疏碳質區域(諸如第二多孔碳質區域 2220)可有利於與經改善鋰硫電池放電-充電循環相關的更高水準之鋰離子傳輸。在一些實行方案中，與第二多孔碳質區域 2220 耦合且相鄰定位之額外碳質區域可具有比第二多孔碳質區域 2220 更低密度之碳質材料。以此方式，更低密度之額外碳質區域可適應更高水準之鋰離子傳輸，以例如允許調諧電極 300 之各種性能特徵。

【0181】 在一個實行方案中，第一多孔碳質區域 2210 可包括第一非三區段顆粒 2211。第一多孔碳質區域內之第一非三區段顆粒 2211 之組態為一個示例性組態。對於非三區段顆粒而言，其他排佈、取向、對準及/或類似者為可能的。在一些態樣中，各非三區段顆粒可為在本揭示案中別處揭示之一或多種碳質材料之實例。第一多孔碳質區域 2210 亦可包括如圖 22 中所展示地散佈在整個第一非三區段顆粒 2211 中或以任何其他排佈、取向、或組態來定位的第一三區段顆粒 2212。各第一三區段顆粒 2212 可為圖 8B 之三區段顆粒 850 的一個實例。另外地或替代地，各第一三區段顆粒 2212 可包括彼此交織在一起且藉由中孔 2214 來彼此隔開的第一碳片段 2213。各三區段顆粒可具有經組態以與相鄰第一非三

區段顆粒 2211 及/或第一三區段顆粒 2212 聚結之第一可變形周邊 2215。

【0182】 第一多孔碳質區域 2210 亦可包括第一聚集物 2216，其中各聚集物包括接合在一起之許多第一三區段顆粒 2212。在一或多個特定實例中，各第一聚集物可具有 10 奈米(nm)與 10 微米(μm)之間的範圍內之主要尺寸。中孔 2214 可散佈在整個第一複數個聚集物中，其中各中孔具有 3.3 奈米(nm)與 19.3 nm 之間的主要尺寸。另外，第一多孔碳質區域 2210 可包括第一團聚物 2217，其中各團聚物包括彼此接合之許多第一聚集物 2216。在一些態樣中，各第一團聚物 2217 可具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的近似範圍內之主要尺寸。大孔 2218 可散佈在整個第一聚集物 2216 中，其中各大孔可具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的主要尺寸。在一些實行方案中，以上論述之碳質材料、同素異形體及/或結構中之一或多者可為圖 9A 及 9B 中展示之一或多個實例。

【0183】 第二多孔碳質可包括第二非三區段顆粒 2221，其可為第一非三區段顆粒 2211 之一個實例。第二多孔碳質區域 2220 可包括第二三區段顆粒 2222，其各自可為第一三區段顆粒 2212 中之各者的一個實例且/或可為圖 8B 之三區段顆粒 850 的一個實例。另外地或替代地，各第二三區段顆粒 2222 可包括彼此交織在一起且藉由中孔 2214 來彼此隔開的第二碳片段 2223。各第二三區段顆粒 2222 可具有經組態以與一或多個相鄰第二非三區段顆粒 2221 或第二三區段顆粒 2222 聚結之第二可變形周邊 2225。

【0184】 另外，第二多孔碳質區域 2220 可包括第二聚集物 2226，其中各第二聚集物 2226 可包括接合在一起之許多第二三區段顆粒 2222。在一或多個特定實例中，各第二聚集物 2226 可具有 10 奈米(nm)與 10 微米(μm)之間的範圍內之主要尺寸。中孔 2214 可散佈在整個第二聚集物 2226 中，各中孔可具有 3.3 奈米(nm)與 19.3 nm 之間的主要尺寸。此外，第二多孔碳質區域 2220 可包括第二團聚物 2227，各第二團聚物 2227 可包括彼此接合之許多第二聚集物 2226，其中各團聚

物可具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的近似範圍內之主要尺寸。大孔 2218 可散佈在整個第二複數個聚集物中，其中各大孔具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的主要尺寸。在一些實行方案中，以上論述之碳質材料、同素異形體及/或結構中之一或多者可為圖 9A 及 9B 中展示之一或多個實例。

【0185】 在一個實行方案中，第一多孔碳質區域 2210 及/或第二多孔碳質區域 2220 可包括選擇性滲透殼(為簡單起見，圖 22 中未展示)，其可分別在第一多孔碳質區域 2210 或第二多孔碳質區域 2220 上形成分離的液相。電解質(諸如在本揭示案中揭示之任何電解質)可分散在第一多孔碳質區域及/或第二多孔碳質區域內，以用於與鋰硫電池放電-充電操作循環相關之鋰離子傳輸。

【0186】 在一或多個特定實例中，第一多孔碳質區域 2210 可在 12,000 鎊/平方吋(psi)之壓力下具有 500 S/m 至 20,000 S/m 之間的近似範圍內之電導率。第二多孔碳質區域 2220 可在 12,000 鎊/平方吋(psi)之壓力下具有 0 S/m 至 500 S/m 之間的近似範圍內之電導率。第一團聚物 2217 及/或第二團聚物 2227 可包括藉由一或多種基於聚合物之黏合劑來彼此連接之聚集物。

【0187】 在一些態樣中，第一三區段顆粒 2212 或第二三區段顆粒 2222 可各自包括圍繞相應的第一三區段顆粒 2212 或第二三區段顆粒 2222 之中心來定位之第一孔隙率區域(為簡單起見，圖 22 中未展示)。第一孔隙率區域可包括第一孔隙。第二孔隙率區域(為簡單起見，圖 22 中未展示)可包圍第一孔隙率區域。第二孔隙率區域可包括第二孔隙。在一個實行方案中，第一孔隙可界定第一孔隙密度，且第二孔隙可界定不同於第一孔隙密度的第二孔隙密度。

【0188】 在一些態樣中，中孔 2214 可分組為第一中孔及第二中孔(為簡單起見，兩者在圖 22 中均未展示)。在一或多個特定實例中，第一中孔可具有第一中孔密度，且第二中孔可具有不同於第一中孔密度之第二中孔密度。另外，大孔 2218 可分組為可具有第一孔隙密度之第一大孔及可具有不同於第一孔隙密度之

第二孔隙密度的第二大孔(為簡單起見，兩者在圖 22 中均未展示)。

【0189】 在一個實行方案中，第一多孔碳質區域 2210 及/或第二多孔碳質區域 2220 可使硫成核，諸如有利於本揭示案所揭示之任何鋰硫電池之操作放電-充電循環所需要的。例如，陰極 2200 可具有大約 1:5 至 10:1 之間的硫與碳重量比。在一些態樣中，一或多種導電添加劑可分散在第一多孔碳質區域 2210 及/或第二多孔碳質區域 2220 內，以例如相應地影響陰極 2200 之放電-充電循環性能。另外，保護鞘(諸如圖 4 之保護性晶格 402)可安置在陰極上。

【0190】 如本文所用，涉及項目清單「中之至少一者」或「中之一或多者」的片語係指彼等項目之任何組合，包括單一成員。例如，“a、b 或 c 中之至少一者”意欲涵蓋以下可能性：僅 a、僅 b、僅 c、a 與 b 之組合、a 與 c 之組合、b 與 c 之組合、及 a 與 b 與 c 之組合。

【0191】 結合本文揭示之實行方案描述之各種說明性部件、邏輯、邏輯塊、模組、電路、操作及演算法過程可經實行為電子硬體、韌體、軟體、或硬體、韌體或軟體之組合，包括本說明書中揭示之結構及其等效結構。硬體、韌體及軟體之可互換性通常按照功能性來描述，且在如上所述之各種示例性部件、區塊、模組、電路及過程中展示。此類功能性是否以硬體、韌體或軟體來實行取決於應用及對整個系統施加之設計制約。

【0192】 本揭示案所描述之實行方案之各種修改可為普通熟習此項技術者顯而易知的，且在本文中定義之通用原則可適用於其他實行方案而不脫離本揭示案之精神或範疇。因此，請求項不意欲限於本文展示之實行方案，而應賦予與本文揭示之本揭示案、原則及新穎特徵一致的最寬範疇。

【0193】 另外，在本說明書中在單獨實行方案之情形中描述之各種特徵亦可在單一實行方案中組合實行。相反地，在單一實行方案之情形中描述之各種特徵亦可分開地在多個實行方案中或在任何合適次組合中實行。因此，雖然特徵

可如上彼此組合地來描述，甚至最初就如這樣來請求保護，但是來自所請求保護之組合之一或多個特徵可在一些情況下自該組合中切除，且所請求保護之組合可針對次組合或次組合之變型。

【0194】 類似地，雖然操作在圖式中以特定次序來描述，但這不應理解為，為了達成期望結果，要求此類操作應以所示特定次序或以順序次序來執行，或所有所示操作皆予以執行。此外，圖式可以流程圖或作業圖形式示意性地描繪一或多個示例性過程。然而，未經描繪之其他操作亦可併入示意性地展示之示例性過程中。例如，一或多個額外操作可在任何所示操作之前、之後、同時、或之間執行。在一些情況下，多任務處理及並行處理可為有利的。另外，如上所述之實行方案中各種系統部件之隔開不應理解為在所有實行方案中皆需要此隔開，且應瞭解，所描述之程式部件及系統一般可在單一產品中整合在一起或包裝至多個產品中。

【符號說明】

【0195】

100:電池

101:第一基板

102:第二基板

105:主體

110:陰極

120:陽極

125:鋰陽離子

130:電解質

111:第一薄膜

112:第二薄膜

150:隔板

142:障壁層

144:機械強度增強劑

174:電子

172:外部負載

140:固體電解質界面相層

142:屏障層

195:方向

200:電池

230:電解質

210:陰極

220:陽極

250:隔板

282:多硫化物

272:負載

226:起始位置

227:最終位置

285:聚合物網路

283:界面層

225:鋰陽離子(Li^+)

240:界面相層

284:保護層

280:保護性晶格

300:電極

301:主體

305:寬度

310:第一薄膜

320:第二薄膜

312:第一聚集物

316:第一多孔結構

314:第一奈米顆粒

326:第二多孔結構

322:第二聚集物

324:第二奈米顆粒

328:主結構

330:鋰層

400:示例性電池

402:保護性晶格

404:裂縫

500:陽極結構

A:第一區域

B:第二區域

516:保護層

502:陽極

514:分級層

5181:第一邊緣

5182:第二邊緣

512:錫-鋰合金區域

510:氟化錫層

5301:第一間隔物邊緣保護區域

5302:第二間隔物邊緣保護區域

540:電解質

544:保形塗層

546:接片

600:放大部分

610:碳質材料

620:黏合劑

640:導電添加劑

714:碳質材料層

702:陽極

750:伍茲反應

710:聚合物網路

740:鹼金屬樹枝狀晶形成

716:密度梯度

720:保護層

718:界面層

800:碳質顆粒

811:第一孔隙率區域

812:第二孔隙率區域

801:第一孔隙

802:第二孔隙

810:周邊

813:可變形區域

820:多硫化物

824:硫

851:第一區段

852:第二區段

853:第三區段

855:滲透性殼層

800C:階梯函數

822:阻擋區域

861:孔隙

862:孔隙

863:孔隙

D1:主要尺寸

D2:主要尺寸

D3:主要尺寸

900:顯微照片

902:碳質結構

904:聚集物

906:團聚物

960:聚集物

952:外部碳質殼型結構

1010:聚集物

958:核心區域

1000 及 1050:透射電子顯微鏡(TEM)影像碳質結構 956

1100:圖

1110:孔隙率 I 型

1120:孔隙率 II 型

1130:孔隙率 III 型

1111:第一孔隙

1112:第二孔隙

1113:第三孔隙

1200:圖表

1:碳

2:碳

1300:第一圖表

1310:第二圖表

1302:電解質

1400:條形圖

1402:電解質

1500:第一圖表

1510:第二圖表

1502:電解質

1600:圖表

1602:電解質

1700:圖表

1702:電解質

1704:溶劑套裝

1800:圖表

1900:第一圖表

1910:第二圖表

2000:第一圖表

2010:第二圖表

2100:第一圖表

2110:第二圖表

2201:主體

2205:寬度

2200:陰極

2210:第一多孔碳質區域

2218:大孔

2220:第二多孔碳質區域

2211:第一非三區段顆粒

2212:第一三區段顆粒

2213:第一碳片段

2214:中孔

2215:第一可變形周邊

2216:第一聚集物

2217:第一團聚物

2221:第二非三區段顆粒

2222:第二三區段顆粒

2223:第二碳片段

2225:第二可變形周邊

2226:第二聚集物

2227:第二團聚物

【發明申請專利範圍】

【請求項 1】　一種包括複數個孔隙之標的組合物，該標的組合物包含：

複數個顆粒，各顆粒包括：

包括複數個第一孔隙之第一區段，該複數個第一孔隙具有均勻孔徑；及

包括複數個第二孔隙之第二區段，該第二區段相對於該第一區段同心地定位且藉由該複數個第一孔隙中之至少一些與該第一區段隔開，其中該複數個第二孔隙具有沿徑向方向自顆粒中心至顆粒邊界逐漸減小之孔徑；

複數個聚集物，各聚集物包括接合在一起之許多顆粒；及

複數個團聚物，各團聚物包括接合在一起之許多聚集物。

【請求項 2】　如請求項 1 之標的組合物，其中各顆粒具有在 20 奈米(nm)與 150 nm 之間的近似範圍內之主要尺寸。

【請求項 3】　如請求項 1 之標的組合物，其中各聚集物具有在 10 奈米(nm)與 10 微米(μm)之間的近似範圍內之主要尺寸。

【請求項 4】　如請求項 1 之標的組合物，其中各團聚物具有在 0.1 微米(μm)與 1,000 μm 之間的近似範圍內之主要尺寸。

【請求項 5】　如請求項 1 之標的組合物，其中各孔隙具有在 0 奈米(nm)與 100 nm 之間的近似範圍內之主要尺寸。

【請求項 6】　如請求項 1 之標的組合物，其中該第一區段具有第一孔隙率且該第二區段具有不同於該第一孔隙率之第二孔隙率。

【請求項 7】　如請求項 1 之標的組合物，其中該第一區段具有第一密度且該第二區段具有不同於該第一密度之第二密度。

【請求項 8】　如請求項 1 之標的組合物，其中該第一區段具有 0.0 立方公分

(cc)/g 與 2.0 cc/g 之間的第一孔隙密度。

【請求項 9】 如請求項 1 之標的組合物，其中該第二區段具有 1.5 立方公分(cc)/g 與 5.0 cc/g 之間的第二孔隙密度。

【請求項 10】 如請求項 1 之標的組合物，其中該標的組合物在 12,000 鎊/平方吋(psi)之壓力下具有 100 西門子(S)/m 至 20,000 S/m 之間的近似範圍內之電導率。

【請求項 11】 如請求項 1 之標的組合物，其中至少一些團聚物用一或多種基於聚合物之黏合劑彼此連接。

【請求項 12】 如請求項 1 之標的組合物，其進一步包括分散於該複數個孔隙中之至少一些內的一或多種導電添加劑。

【請求項 13】 如請求項 1 之標的組合物，其中各顆粒包括平坦石墨烯、起皺石墨烯、複數個碳奈米管(CNT)或複數個碳奈米洋蔥(CNO)中之一或多者。

【請求項 14】 如請求項 1 之標的組合物，其中各顆粒進一步包括第三區段，該第三區段與相應顆粒之中心同心地安置在該第二區段上且藉由該複數個孔隙中之至少一些與該第二區段隔開，該第三區段包括複數個第三孔隙。

【請求項 15】 如請求項 1 之標的組合物，其中該複數個第一孔隙為大孔，該複數個第二孔隙為中孔，且該複數個第三孔隙為微孔。

【請求項 16】 如請求項 1 之標的組合物，其中各顆粒進一步包括一或多個額外區段，該一或多個額外區段與相應顆粒之中心同心地安置在該第二區段上，且該一或多個額外區段中之各者藉由該複數個孔隙中之至少一些與緊鄰之區段隔開。

【請求項 17】 如請求項 1 之標的組合物，其中該複數個第二孔隙之孔隙之孔徑沿該徑向方向逐漸減小。

【請求項 18】 一種電池，其包含：

一陽極，該陽極包括鹼金屬，該陽極經組態以在該電池之循環期間釋放複數個鹼金屬離子；

一聚合物網路，該聚合物網路沉積在該陽極之一或多個暴露表面之上，該聚合物網路包括用彼此交聯之複數個氟化聚合物鏈接枝之碳質材料，該複數個氟化聚合物鏈經組態以響應於該電池之操作循環而產生鹼金屬氟化物，該鹼金屬氟化物經組態以抑制自該陽極之鹼金屬枝晶形成，其中該等碳質材料包括平坦石墨烯、起皺石墨烯、複數個碳奈米管(CNT)或複數個碳奈米洋蔥(CNO)中之一或多者；

一陰極，該陰極與該陽極相對定位；

一電解質，該電解質至少部分地分散在整個該陰極中且與該陽極接觸，該電解質經組態以在該陰極與該陽極之間傳輸該複數個鹼金屬離子；及

一隔板，該隔板定位在該陽極與該陰極之間。

【請求項 19】 如請求項 18 之電池，其中該複數個氟化聚合物鏈包括複數種單體，一或多種單體包括丙烯酸 2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7-十二氟庚酯(DFHA)、甲基丙烯酸 3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-十七氟癸酯(HDFDMA)、甲基丙烯酸 2,2,3,3,4,4,5,5-八氟戊酯(OFPMA)、甲基丙烯酸四氟丙酯(TFPM)、3-[3,3,3-三氟-2-羥基-2-(三氟甲基)丙基]雙環[2.2.1]庚-2-基甲基丙烯酸酯(HFA 單體)、或基於乙烯基之單體(包括 2,3,4,5,6-五氟苯乙烯(PFSt))。

【請求項 20】 如請求項 18 之電池，其中該聚合物網路具有大約 0.001 μm 與 5 μm 之間的厚度。

【請求項 21】 如請求項 18 之電池，其中該複數個氟化聚合物鏈經接枝至該等碳質材料之表面。

【請求項 22】 如請求項 21 之電池，其中該接枝係基於一或多種自由基引發劑，該一或多種自由基引發劑包括過氧化苯甲醯(BPO)或偶氮二異丁腈

(AIBN)中之至少一種。

【請求項 23】 如請求項 21 之電池，其中該陽極包括經組態以嵌入鹼金屬離子(AIBN)的至少一些相鄰石墨烯薄片。

【請求項 24】 如請求項 18 之電池，其中該複數個氟化聚合物鏈經組態以經由伍茲反應與至少一些鹼金屬離子發生化學相互作用。

【請求項 25】 如請求項 24 之電池，其中該伍茲反應與該鹼金屬氟化物之產生相關。

【請求項 26】 如請求項 18 之電池，其進一步包括分散於整個該聚合物網路中之複數個石墨烯奈米片，其中該等石墨烯奈米片在該聚合物網路內彼此隔離。

【請求項 27】 如請求項 26 之電池，其中該等石墨烯奈米片之分散包括一或多個不同濃度水準。

【請求項 28】 如請求項 27 之電池，其中該等石墨烯奈米片之分散進一步包括用該複數個氟化聚合物鏈中之至少一些來官能化之至少一些該等碳質材料。

【請求項 29】 如請求項 18 之電池，其中該聚合物網路包括大約 0.001 重量%至 2 重量%之間的該等氟化聚合物鏈。

【請求項 30】 如請求項 18 之電池，其中該聚合物網路進一步包含：

一界面層，該界面層與該陽極接觸；及

一保護層，該保護層安置在該界面層之頂部。

【請求項 31】 如請求項 30 之電池，其中該界面層包括複數種可交聯單體中之一或多者，該等單體包括甲基丙烯酸酯(MA)、丙烯酸酯、乙烯基官能基、或環氧官能基與胺官能基之組合。

【請求項 32】 如請求項 31 之電池，其中該保護層係藉由密度梯度表征。

【請求項 33】 如請求項 32 之電池，其中該密度梯度與該保護層之一或多種自

我修復性質相關。

【請求項 34】 如請求項 32 之電池，其中該密度梯度經組態以加強該聚合物網路。

【請求項 35】 如請求項 32 之電池，其中該聚合物網路經組態以抑制自該陽極之枝晶生長。

【請求項 36】 如請求項 18 之電池，其中該陽極係鹼金屬層。

【請求項 37】 如請求項 18 之電池，其進一步包括一安置在該陰極上之膜，該膜包括一晶格，該晶格包括彼此化學鍵結之三官能環氧化合物及二胺寡聚物化合物，其中該膜與在該電池之循環期間產生的含鹼金屬之多硫化物中間物之化學鍵結相關。

【請求項 38】 如請求項 18 之電池，其中該聚合物網路包括大約 5 重量%至 100 重量%之間的用該等氟化聚合物鏈接枝之該複數種碳質材料且其餘為氟化聚合物、一或多種非氟化聚合物、一或多種可交聯單體、或其任何組合。

【請求項 39】 如請求項 18 之電池，其中用該等氟化聚合物鏈接枝之該複數種碳質材料包括 5 重量%至 50 重量%之該等氟化聚合物鍊且其餘為碳質材料。

【請求項 40】 一種電池，其包含：

一陽極，該陽極包括一聚合物網路，該聚合物網路包括用複數個氟化聚合物鏈接枝之碳質材料，該複數個氟化聚合物鏈經交聯成一晶格，該陽極經組態以在該電池之操作循環期間輸出複數個鹼金屬離子；

一陰極，該陰極與該陽極相對定位；

一保護鞘，該保護鞘安置在該陰極上，該保護鞘包括經組態以相互化學反應的三官能環氧化合物及基於二胺寡聚物之化合物；

一電解質，該電解質至少部分地分散在整個該陰極中且與該陽極接觸，該電解質經組態以在該陰極與該陽極之間傳輸該複數個鹼金屬離子；及

一隔板，該隔板定位在該陽極與該陰極之間。

【請求項 41】 如請求項 40 之電池，其中該晶格經組態以響應於該電池之操作循環而產生鹼金屬氟化物，該鹼金屬氟化物經組態以抑制自該陽極之鹼金屬枝晶形成。

【請求項 42】 如請求項 40 之電池，其中該聚合物網路沉積在該陽極之一或多個暴露表面之上。

【請求項 43】 如請求項 40 之電池，其中該等碳質材料包括平坦石墨烯、起皺石墨烯、複數個碳奈米管(CNT)或複數個碳奈米洋蔥(CNO)中之一或多者。

【請求項 44】 如請求項 40 之電池，其中該複數個氟化聚合物鏈包括複數種單體，一或多種單體包括丙烯酸 2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7-十二氟庚酯(DFHA)、甲基丙烯酸 3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-十七氟癸酯(HDFDMA)、甲基丙烯酸 2,2,3,3,4,4,5,5-八氟戊酯(OFPMA)、甲基丙烯酸四氟丙酯(TFPM)、3-[3,3,3-三氟-2-羥基-2-(三氟甲基)丙基]雙環[2.2.1]庚-2-基甲基丙烯酸酯(HFA 單體)、或基於乙烯基之單體(包括 2,3,4,5,6-五氟苯乙烯(PFSt))。

【請求項 45】 如請求項 40 之電池，其中該聚合物網路具有大約 0.001 μm 與 5 μm 之間的厚度。

【請求項 46】 如請求項 40 之電池，其中該複數個氟化聚合物鏈中之至少一些經接枝至該等碳質材料中之相應一者的表面。

【請求項 47】 如請求項 40 之電池，其中該複數個氟化聚合物鏈經組態以經由伍茲反應與該陽極之鹼金屬之一或多個表面發生化學相互作用。

【請求項 48】 如請求項 40 之電池，其中該等碳質材料包括分散於整個該聚合物網路中之複數個石墨烯奈米片，其中該等石墨烯奈米片在該聚合物網路內彼此隔離。

【請求項 49】 如請求項 48 之電池，其中該複數個石墨烯奈米片在整個該聚合

物網路中之分散包括一或多個不同濃度水準。

【請求項 50】 如請求項 48 之電池，其中該複數個石墨烯奈米片中之至少一些用該複數個氟化聚合物鏈中之至少一些官能化。

【請求項 51】 如請求項 40 之電池，其中該聚合物網路包括大約 0.001 重量%至 2 重量%之間的該等氟化聚合物鏈。

【請求項 52】 如請求項 40 之電池，其中該聚合物網路進一步包含：

一界面相區域，該界面相區域與該陽極接觸；及

一保護區域，該保護區域安置在該界面相區域之頂部。

【請求項 53】 如請求項 52 之電池，其中該界面相區域係基於該陽極與該聚合物網路之間的界面處之伍茲反應。

【請求項 54】 如請求項 52 之電池，其中該界面相區域包括複數種可交聯單體中之一或多者，該等單體包括甲基丙烯酸酯(MA)、丙烯酸酯、乙烯基官能基、或環氧官能基與一或多個胺官能基之組合。

【請求項 55】 如請求項 52 之電池，其中該保護區域係藉由密度梯度表征。

【請求項 56】 如請求項 55 之電池，其中該密度梯度與該保護區域之一或多種自我修復性質相關。

【請求項 57】 如請求項 55 之電池，其中該密度梯度經組態以加強該聚合物網路。

【請求項 58】 如請求項 40 之電池，其中該聚合物網路經組態以抑制自該陽極之枝晶生長。

【請求項 59】 如請求項 40 之電池，其中該陽極進一步包括一或多個暴露表面，各暴露表面包括一或多個含鹼金屬之奈米結構或微結構。

【請求項 60】 如請求項 59 之電池，其中該一或多個含鹼金屬之奈米結構或微結構中之各者包括至少一些該等碳質材料。

【請求項 61】 如請求項 40 之電池，其中該陽極包括三維(3D)結構。

【請求項 62】 一種電池，其包含：

一陽極，該陽極以晶格組態佈置且包括一或多種碳質材料；

一陰極，該陰極與該陽極相對定位；

一隔板，該隔板安置在該陽極與該陰極之間；

一保護鞘，該保護鞘安置在該陰極上，該保護鞘包括經組態以相互化學反應的三官能環氧化合物及基於二胺寡聚物之化合物；及

一電解質，該電解質至少部分地分散在該陰極內且與該陽極接觸。

【請求項 63】 如請求項 62 之電池，其進一步包括沉積在該陽極之一或多個暴露表面之上的一聚合物網路，該聚合物網路包括與該一或多種碳質材料接枝且彼此交聯的複數個氟化聚合物鏈。

【請求項 64】 如請求項 63 之電池，其中該聚合物網路進一步包括鹼金屬氟化物，該鹼金屬氟化物經組態以抑制與該陽極相關的鹼金屬枝晶形成。

【請求項 65】 如請求項 62 之電池，其中該保護鞘經組態以基於該保護鞘與一或多種含鋰多硫化物中間物之間的化學鍵結來防止該電池內的多硫化物遷移。

【請求項 66】 如請求項 62 之電池，其進一步包括延伸至該陰極中之一或多個裂縫，且其中該保護鞘分散於該一或多個裂縫中。

【請求項 67】 如請求項 62 之電池，其中該保護鞘經組態以降低該陰極對破裂之敏感性。

【請求項 68】 如請求項 62 之電池，其中該保護鞘具有基於該三官能環氧化合物及該基於二胺寡聚物之化合物的交聯三維結構。

【請求項 69】 如請求項 68 之電池，其中該三官能環氧化合物為三羥甲基丙烷三縮水甘油醚(TMPTE)、參(4-羥苯基)甲烷三縮水甘油醚、或參(2,3-環氧丙

基)異氰脲酸酯中之一或多種。

【請求項 70】 如請求項 69 之電池，其中該基於二胺寡聚物之化合物為二醯肼亞碸(DHSO)或 JEFFAMINE® D-230 聚醚胺中之一或多種。

【請求項 71】 如請求項 62 之電池，其中該保護鞘包括三羥甲基丙烷參[聚(丙二醇)及胺封端之醚。

【請求項 72】 如請求項 62 之電池，其中該等碳質材料包括平坦石墨烯、起皺石墨烯、複數個碳奈米管(CNT)或複數個碳奈米洋蔥(CNO)中之一或多者。

【請求項 73】 如請求項 62 之電池，其中該陰極包括一主結構，該主結構包括平坦石墨烯、起皺石墨烯、碳奈米管(CNT)或碳奈米洋蔥(CNO)中之一或多者，且該陽極包括一固體鋰金屬層。

【請求項 74】 如請求項 62 之電池，其進一步包括：

一安置在該陽極上之氟化錫層；及

一形成於該氟化錫層與該陽極之間的氟化鋰層，其中該氟化鋰層與氟離子與鋰離子之間的反應相關。

【請求項 75】 如請求項 74 之電池，其中該氟化鋰層經組態以抑制自該陽極之枝晶生長。

【請求項 76】 如請求項 62 之電池，其進一步包括一安置在該陽極上之固體電解質界面相層，該固體電解質界面相層包括錫、錳、鉬、氟化合物、氟化錫、氟化錳、氮化矽、氮化鋰、硝酸鋰、磷酸鋰、氧化錳或氧化鋰鑭鋯(LLZO)中之一或多種。

【請求項 77】 一種電池，其包含：

一陽極，該陽極經組態以在該電池之循環期間輸出複數個鋰離子；

一安置在該陽極上之分級層，該分級層包含一聚合物網路，該聚合物網路包括由與石墨烯奈米片相關的起皺石墨烯形成之密度梯度，該等石墨烯奈米

片分散於整個該聚合物網路中且在該聚合物網路內彼此隔離，至少一些起皺石墨烯經組態以沿一或多個撓曲點在體積上膨脹且保持該電池之循環期間產生的多硫化物，該聚合物網路包括：

接枝至至少一些起皺石墨烯之一或多個撓曲點上的複數個氟化聚(甲基)丙烯酸酯；

該聚合物網路內的複數個碳-氟(C-F)鍵，該複數個碳-氟(C-F)鍵中之至少一些經組態以藉由伍茲反應與該複數個鋰離子中之至少一些發生化學反應，且藉由置換氟離子(F^-)而轉化成碳-鋰(C-Li)鍵；

在該伍茲反應期間的氟離子(F^-)置換過程中形成之複數個碳-碳(C-C)鍵，碳-碳(C-C)鍵之形成與該聚合物網路之交聯相關；及

響應於氟離子(F^-)置換而形成之氟化鋰(LiF)，氟化鋰(LiF)與該複數個鋰離子中之至少一些的消耗相關；及

一陰極，該陰極與該陽極相對定位；

一電解質，該電解質分散在整個該陰極中且分散在整個該陽極中；及

一隔板，該隔板定位在該陽極與該陰極之間。

【請求項 78】 如請求項 77 之電池，其進一步包括在該電池之循環期間暴露於該電解質之該陽極之表面處形成的一固體電解質界面相。

【請求項 79】 如請求項 78 之電池，其中該分級層經組態以在該電池之循環期間生長該固體電解質界面相。

【請求項 80】 如請求項 77 之電池，其中該分級層藉由原子層沉積(ALD)、化學氣相沉積(CVD)、或物理氣相沉積(PVD)中之一或多者沉積於該陽極上。

【請求項 81】 一種電池，其包含：

一陽極，該陽極經組態以在該電池之循環期間輸出複數個鋰離子；

一安置在該陽極上之分級層，該分級層包括一聚合物網路，該聚合物網路

包括由與石墨烯奈米片相關的起皺石墨烯形成之密度梯度，該等石墨烯奈米片分散於整個該聚合物網路中且在該聚合物網路內彼此隔離，至少一些起皺石墨烯經組態以沿一或多個撓曲點在體積上膨脹且保持該電池之循環期間產生的多硫化物，該聚合物網路包括：

接枝至至少一些起皺石墨烯之一或多個撓曲點上的複數個氟化聚(甲基)丙烯酸酯；

該聚合物網路內的複數個碳-氟(C-F)鍵，該複數個碳-氟(C-F)鍵中之至少一些經組態以藉由伍茲反應與該複數個鋰離子中之至少一些發生化學反應，且藉由置換氟離子(F^-)而轉化成碳-鋰(C-Li)鍵；及

在該伍茲反應期間的氟離子(F^-)置換過程中形成之複數個碳-碳(C-C)鍵，碳-碳(C-C)鍵之形成與該聚合物網路之交聯相關；及

響應於該複數個碳-碳(C-C)鍵中之至少一些的形成而形成之氟化鋰(LiF)，氟化鋰(LiF)與該複數個鋰離子中之至少一些的消耗相關；

一陰極，該陰極與該陽極相對定位且包含複數個孔隙，該陰極進一步包括：

複數個非三區段顆粒；

複數個三區段顆粒，各三區段顆粒包括：

複數個碳片段，該複數個碳片段彼此交織在一起且藉由中孔彼此隔開；及

一可變形周邊，該可變形周邊經組態以與一或多個相鄰非三區段顆粒或三區段顆粒聚結；

複數個聚集物，各聚集物包括接合在一起之許多三區段顆粒；

複數個中孔，該複數個中孔散佈於整個該複數個聚集物中；

複數個團聚物，各團聚物包括彼此接合之許多聚集物；及

複數個大孔，該複數個大孔散佈於整個該複數個聚集物中；及

一電解質，該電解質分散在整個該陰極及該陽極中；及

一隔板，該隔板定位在該陽極與該陰極之間。

【請求項 82】 如請求項 81 之陰極，其中各聚集物具有在 10 奈米(nm)與 10 微米(μm)之間的範圍內之主要尺寸。

【請求項 83】 如請求項 81 之陰極，其中各中孔具有 3.3 奈米(nm)與 19.3 nm 之間的主要尺寸。

【請求項 84】 如請求項 81 之陰極，其中各團聚物具有在 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的近似範圍內之主要尺寸。

【請求項 85】 如請求項 77 之陰極，其中各團聚物具有在 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的近似範圍內之主要尺寸。

【請求項 86】 一種陰極，其包含：

一第一多孔碳質區域，該第一多孔碳質區域由第一濃度水準之碳質材料形成，該第一多孔碳質區域包括：

一第一複數個非三區段顆粒；

一第一複數個三區段顆粒，各三區段顆粒包括：

一第一複數個碳片段，該第一複數個碳片段彼此交織在一起且藉由中孔彼此隔開；及

一第一可變形周邊，該第一可變形周邊經組態以與一或多個相鄰非三區段顆粒或三區段顆粒聚結；

一第一複數個聚集物，各聚集物包括接合在一起之許多三區段顆粒，各聚集物具有 10 奈米(nm)與 10 微米(μm)之間的範圍內之主要尺寸；

一第一複數個中孔，該第一複數個中孔散佈於整個該第一複數個聚集物中，各中孔具有 3.3 奈米(nm)與 19.3 nm 之間的主要尺寸；

一第一複數個團聚物，各團聚物包括彼此接合之許多聚集物，各團聚物

具有在 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的近似範圍內之主要尺寸；及

一第一複數個大孔，該第一複數個大孔散佈於整個該第一複數個聚集物中，各大孔具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的主要尺寸；及

一第二多孔碳質區域，該第二多孔碳質區域與該第一多孔碳質區域相鄰定位，該第二多孔碳質區域由與該碳質材料第一濃度水準不同的第二濃度水準之碳質材料形成，該第二多孔碳質區域包括：

一第二複數個非三區段顆粒；

一第二複數個三區段顆粒，各三區段顆粒包括：

一第二複數個碳片段，該第二複數個碳片段彼此交織在一起且藉由中孔彼此隔開；及

一第二可變形周邊，該第二可變形周邊經組態以與一或多個相鄰非三區段顆粒或三區段顆粒聚結；

一第二複數個聚集物，各聚集物包括接合在一起之許多三區段顆粒，各聚集物具有 10 奈米(nm)與 10 微米(μm)之間的範圍內之主要尺寸；

一第二複數個中孔，該第二複數個中孔散佈於整個該第二複數個聚集物中，各中孔具有 3.3 奈米(nm)與 19.3 nm 之間的主要尺寸；

一第二複數個團聚物，各團聚物包括彼此接合之許多聚集物，各團聚物具有在 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的近似範圍內之主要尺寸；及

一第二複數個大孔，該第二複數個大孔散佈於整個該第二複數個聚集物中，各大孔具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的主要尺寸。

【請求項 87】 如請求項 86 之陰極，其中該第一多孔碳質區域或該第二多孔碳質區域中之一或多者進一步包括一選擇性滲透殼，該選擇性滲透殼經組態以分別在該第一多孔碳質區域或該第二多孔碳質區域上形成一分離的液相。

【請求項 88】 如請求項 86 之陰極，其進一步包括分散在該第一多孔碳質區域

或該第二多孔碳質區域中之一或多者內的一電解質。

【請求項 89】 如請求項 86 之陰極，其中該第一多孔碳質區域在 12,000 鎊/平方吋(psi)之壓力下具有 500 S/m 至 20,000 S/m 之間的近似範圍內之電導率。

【請求項 90】 如請求項 86 之陰極，其中該第二多孔碳質區域在 12,000 鎊/平方吋(psi)之壓力下具有 0 S/m 至 500 S/m 之間的近似範圍內之電導率。

【請求項 91】 如請求項 86 之陰極，其中該第一複數個團聚物或該第二複數個團聚物中之一或多者包括用一或多種基於聚合物之黏合劑彼此連接之聚集物。

【請求項 92】 如請求項 86 之陰極，其中該三區段顆粒中之各者包括：

一第一孔隙率區域，該第一孔隙率區域圍繞該等三區段顆粒中之各者之中心定位，該第一孔隙率區域包括第一孔隙；及

一第二孔隙率區域，該第二孔隙率區域包圍該第一孔隙率區域，該第二孔隙率區域包括第二孔隙。

【請求項 93】 如請求項 86 之陰極，其中該第一孔隙界定第一孔隙密度，且第二孔隙界定不同於該第一孔隙密度之第二孔隙密度。

【請求項 94】 如請求項 86 之陰極，其進一步包括一或多個額外多孔碳質區域，至少一個額外多孔碳質區域與該第二多孔碳質區域耦合。

【請求項 95】 如請求項 94 之陰極，其中一或多個額外多孔碳質區域在遠離該第一多孔碳質區域之方向上、以碳質材料之濃度水準逐步降低之次序佈置。

【請求項 96】 如請求項 86 之陰極，其中該第一複數個中孔具有第一中孔密度，且該第二複數個中孔具有不同於該第一中孔密度之第二中孔密度。

【請求項 97】 如請求項 86 之陰極，其中該第一複數個大孔具有第一孔隙密度，且該第二複數個大孔具有不同於該第一孔隙密度之第二孔隙密度。

【請求項 98】 如請求項 86 之陰極，其中該第一多孔碳質區域或該第二多孔碳

質區域中之一或多者經組態以使硫成核。

【請求項 99】 如請求項 86 之陰極，其中該陰極具有大約 1:5 至 10:1 之間的硫與碳重量比。

【請求項 100】如請求項 86 之陰極，其進一步包括分散在該第一多孔碳質區域或該第二多孔碳質區域中之一或多者內的一或多種導電添加劑。

【請求項 101】如請求項 86 之陰極，其進一步包括一安置在該陰極上之保護鞘。

【請求項 102】如請求項 101 之陰極，其中該保護鞘包括：

三官能環氧化合物，及

基於二胺寡聚物之化合物，該二者經組態以相互化學反應。

【請求項 103】如請求項 102 之陰極，其中該陰極經併入一鋰硫電池中。

【請求項 104】如請求項 103 之陰極，其中該三官能環氧化合物為三羥甲基丙烷三縮水甘油醚(TMPTE)、參(4-羥苯基)甲烷三縮水甘油醚、或參(2,3-環氧丙基)異氰脲酸酯中之一或多種。

【請求項 105】如請求項 103 之陰極，其中該保護鞘經組態以基於該保護鞘與在該鋰硫電池之操作放電-充電循環期間產生的一或多種含鋰多硫化物中間物之間的化學鍵結來防止該鋰硫電池內之多硫化物遷移。

【請求項 106】一種包括複數個孔隙之標的組合物，該標的組合物包含：

複數個非三區段顆粒；

複數個三區段顆粒，各三區段顆粒包括：

複數個碳片段，該複數個碳片段彼此交織在一起且藉由中孔彼此隔開；及

一可變形周邊，該可變形周邊經組態以與一或多個相鄰非三區段顆粒或三區段顆粒聚結；

複數個聚集物，各聚集物包括接合在一起之許多三區段顆粒，各聚集物具

有 10 奈米(nm)與 10 微米(μm)之間的範圍內之主要尺寸；

複數個中孔，該複數個中孔散佈於整個該複數個聚集物中，各中孔具有 3.3 奈米(nm)與 19.3 nm 之間的主要尺寸；

複數個團聚物，各團聚物包括彼此接合之許多聚集物，各團聚物具有在 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的近似範圍內之主要尺寸；及

複數個大孔，該複數個大孔散佈於整個該複數個團聚物中，各大孔具有 0.1 μm 與 1,000 μm 之間的主要尺寸。

【請求項 107】如請求項 106 之標的組合物，其進一步包括一選擇性滲透殼，該選擇性滲透殼經組態以在該標的組合物之一或多個暴露表面上形成一分離的液相。

【請求項 108】如請求項 106 之標的組合物，其進一步包括一分散在該標的組合物內之電解質。

【請求項 109】如請求項 106 之標的組合物，其中各孔隙具有在 0 奈米(nm)與 32.3 nm 之間的近似範圍內之主要尺寸。

【請求項 110】如請求項 106 之標的組合物，其中該標的組合物在 12,000 鎊/平方吋(psi)之壓力下具有 100 S/m 至 20,000 S/m 之間的近似範圍內之電導率。

【請求項 111】如請求項 106 之標的組合物，其中至少一些團聚物用一或多種基於聚合物之黏合劑彼此連接。

【請求項 112】如請求項 106 之標的組合物，其中該三區段顆粒中之各者包括：

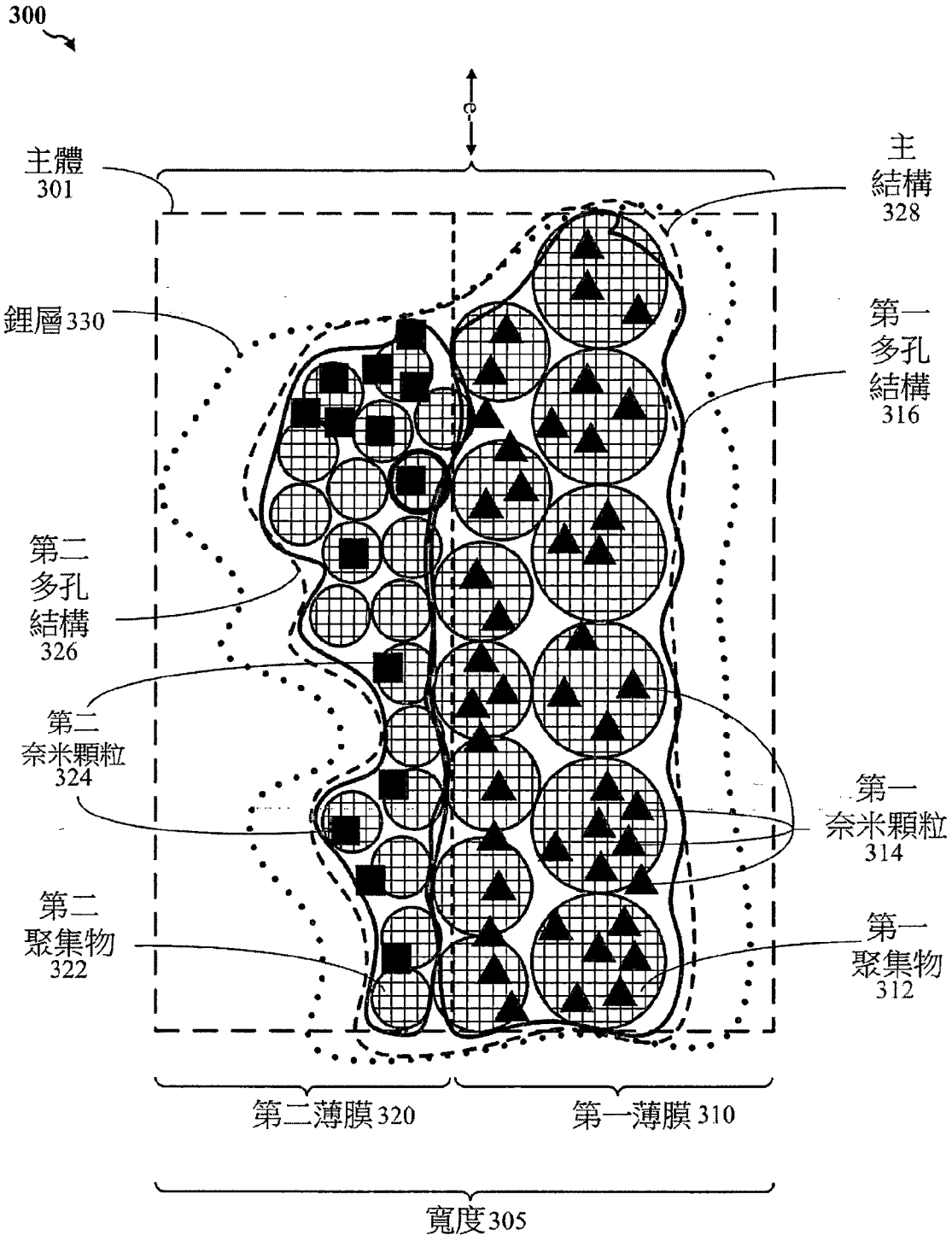
一第一孔隙率區域，該第一孔隙率區域圍繞該等三區段顆粒中之各者之中心定位，該第一孔隙率區域包括第一孔隙；及

一第二孔隙率區域，該第二孔隙率區域包圍該第一孔隙率區域，該第二孔隙率區域包括第二孔隙。

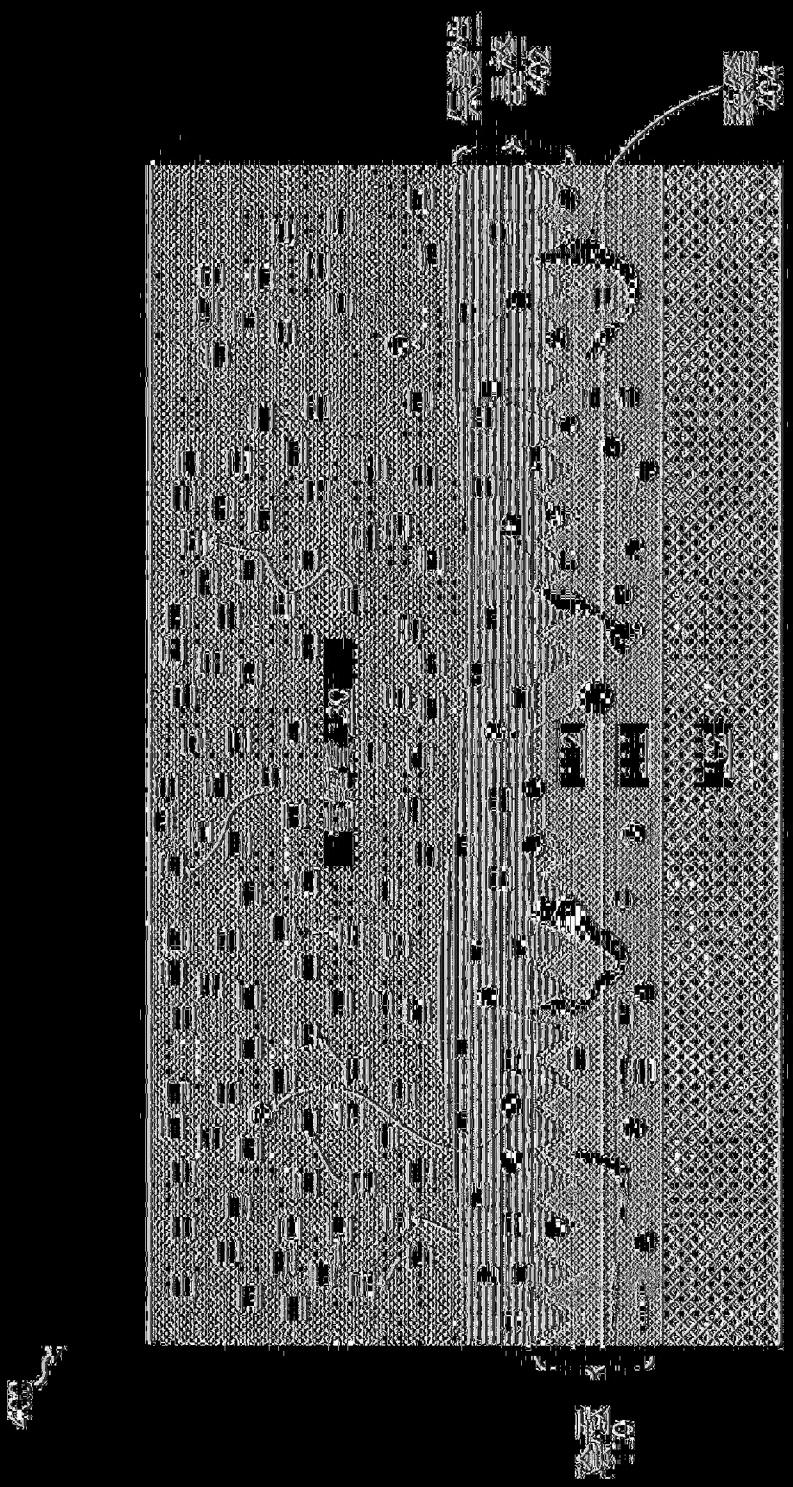
【請求項 113】如請求項 112 之標的組合物，其中該第一孔隙界定第一孔隙密

度，且第二孔隙界定不同於該第一孔隙密度之第二孔隙密度。

[图 2]


300
主體
301
主
結構
328
鋰層330
第一
多孔
結構
316
第二
多孔
結構
326
第二
奈米顆粒
324
第一
奈米顆粒
314
第二
聚集物
322
第一
聚集物
312
第二薄膜320
第一薄膜310
寬度305

【圖 3】



[Fig. 4]

FIG. 5

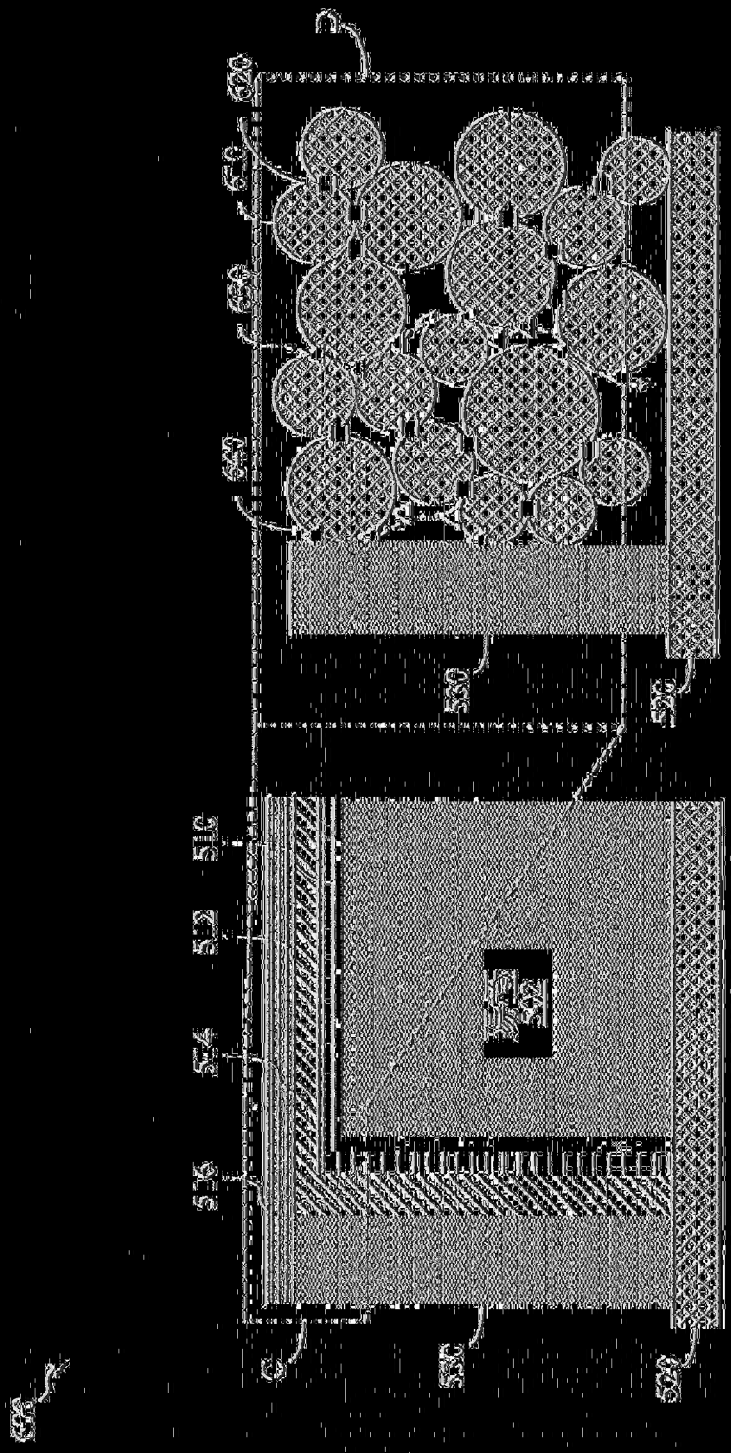
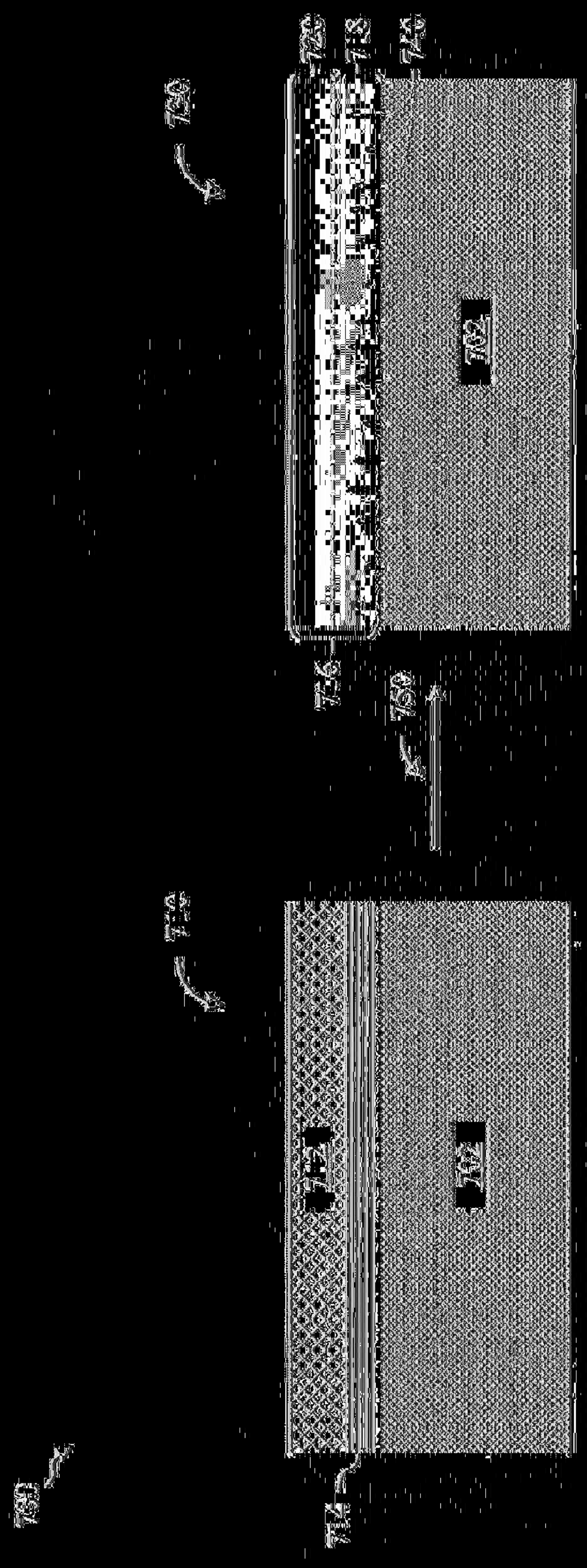
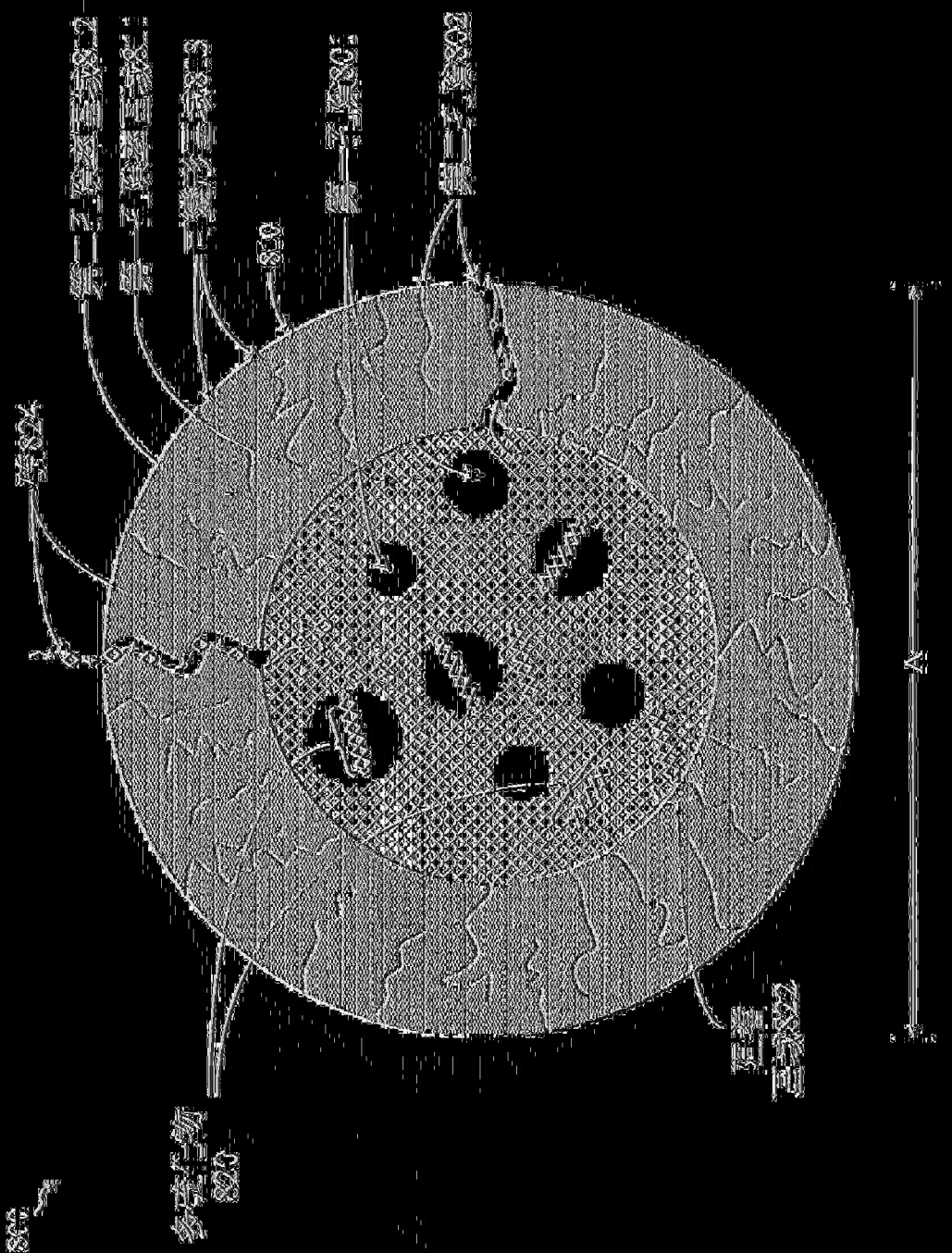


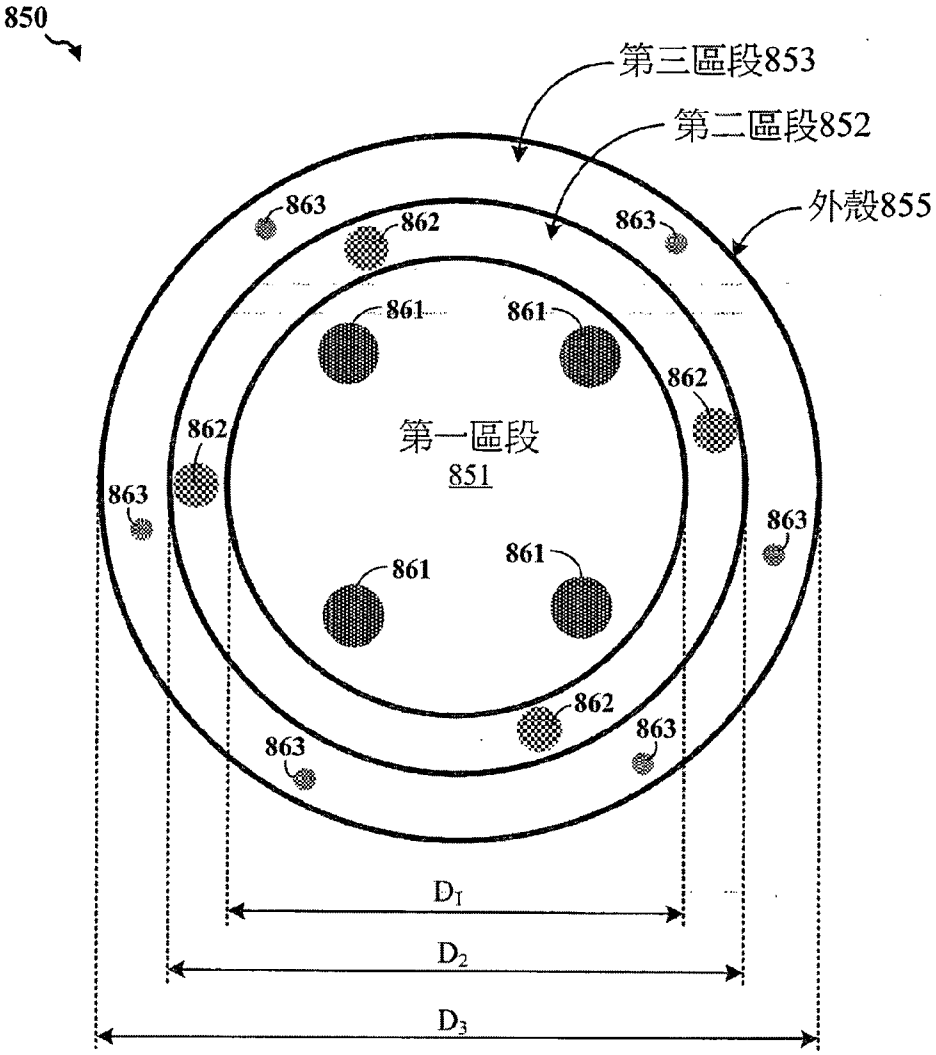
图 6



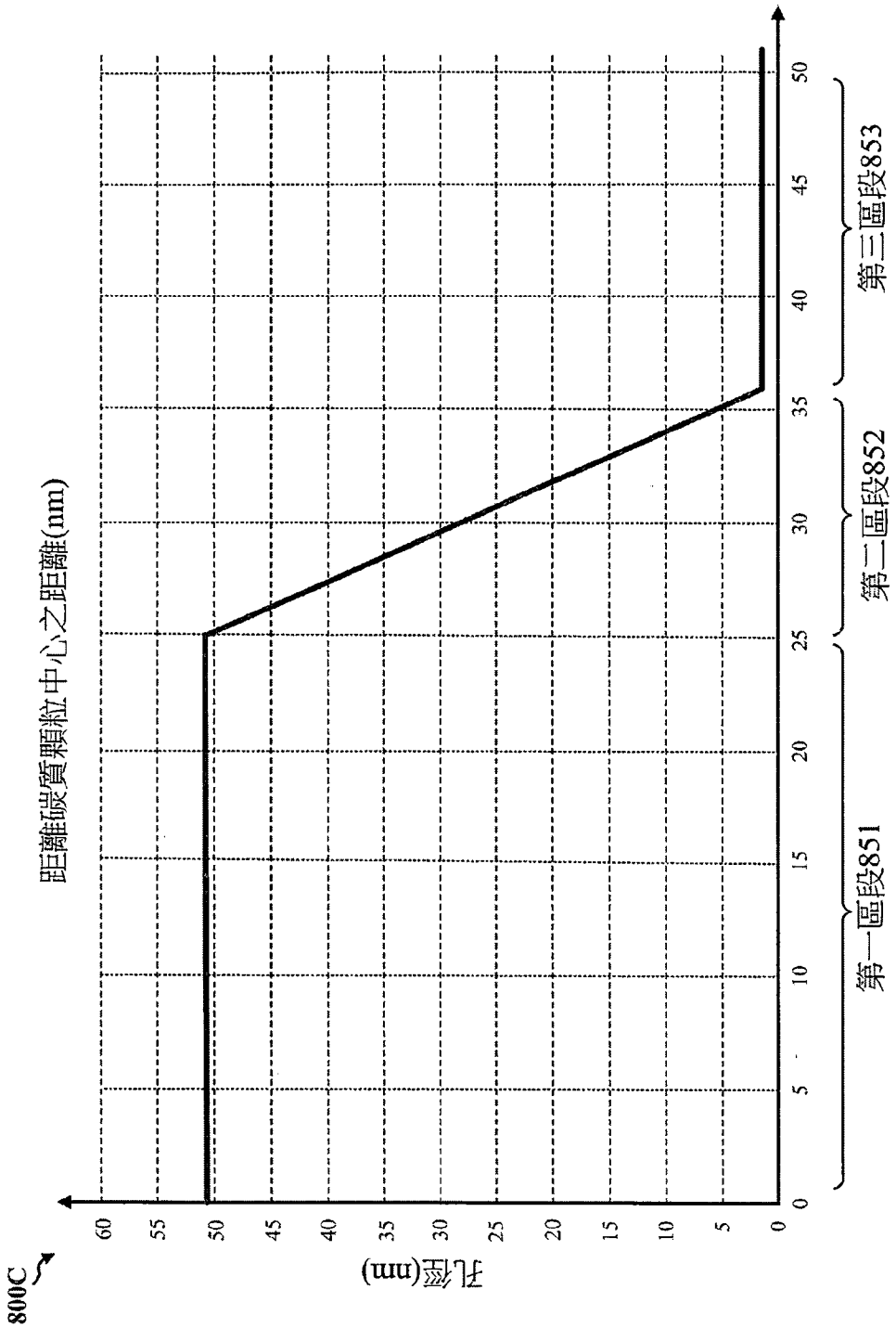
【圖7】



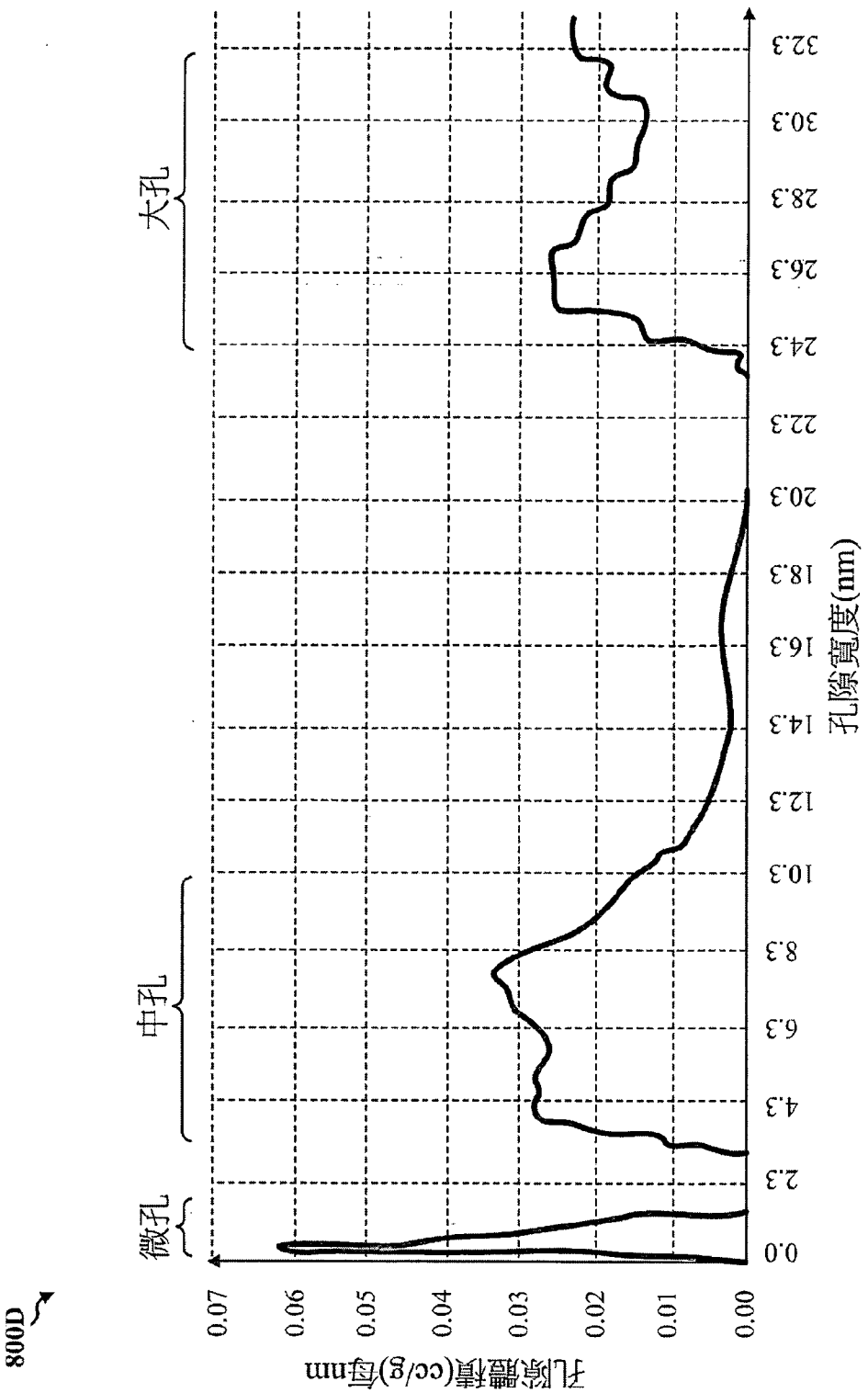
【図８Ａ】


850
第三區段853
第二區段852
外殼855
863
862
863
861
861
862
862
第一區段
851
863
863
861
861
862
863
863
D_1
D_2
D_3

【圖 8B】



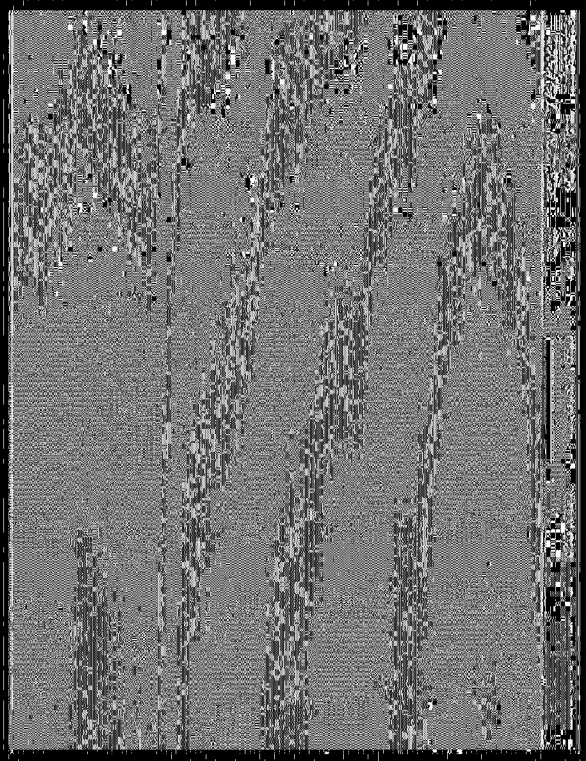
【圖 8C】


800D
微孔
中孔
大孔
孔隙體積(cc/g)每nm
0.00
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
孔隙寬度(nm)
0.0
2.3
4.3
6.3
8.3
10.3
12.3
14.3
16.3
18.3
20.3
22.3
24.3
26.3
28.3
30.3
32.3

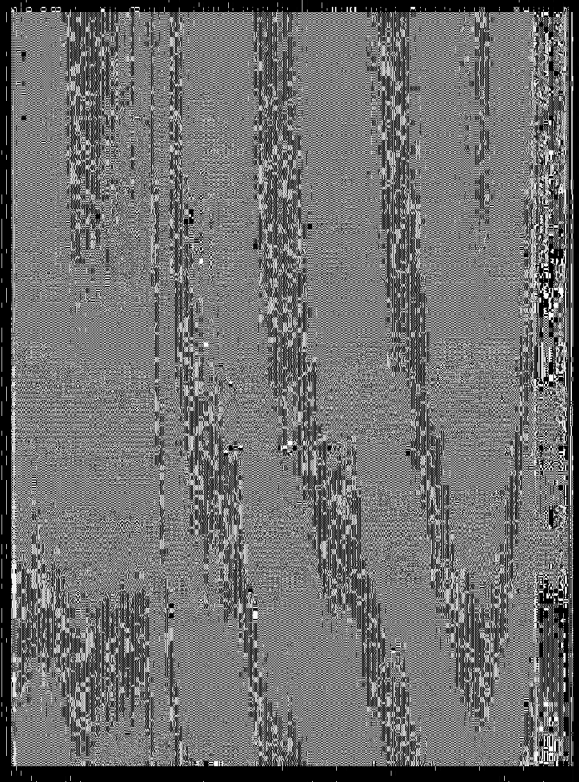
【圖 8D】

【図9A】

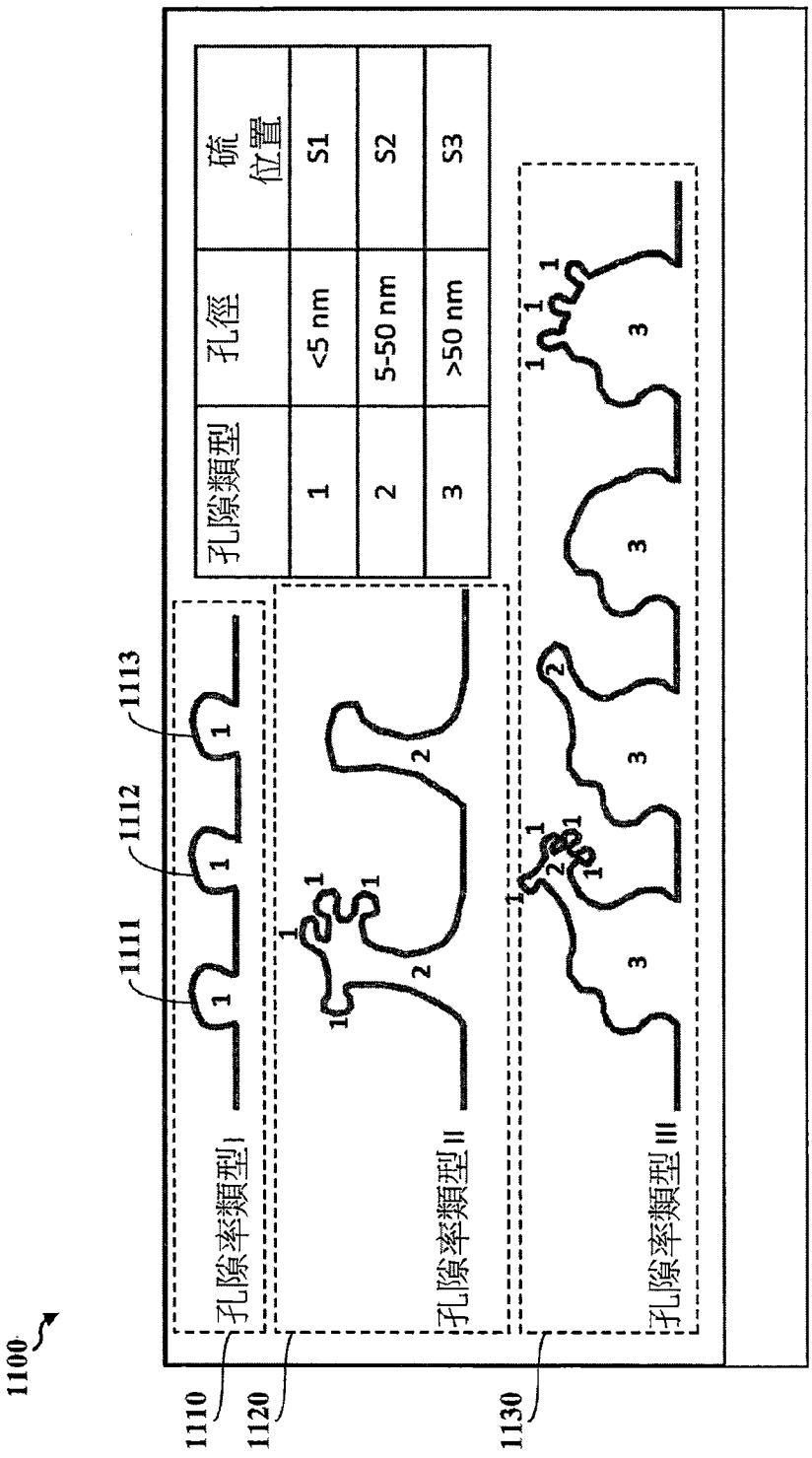
【図9B】



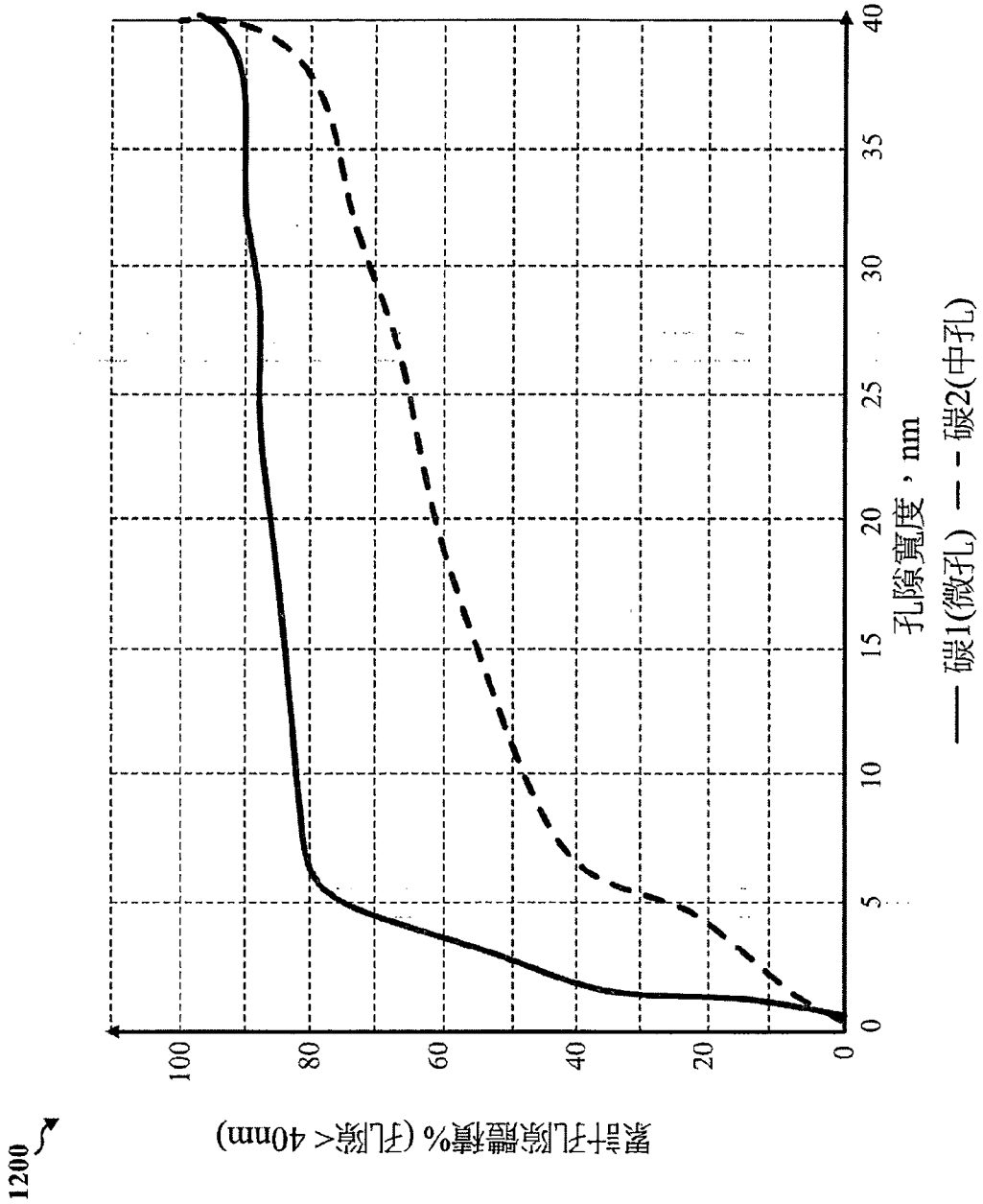
[도면 10A]



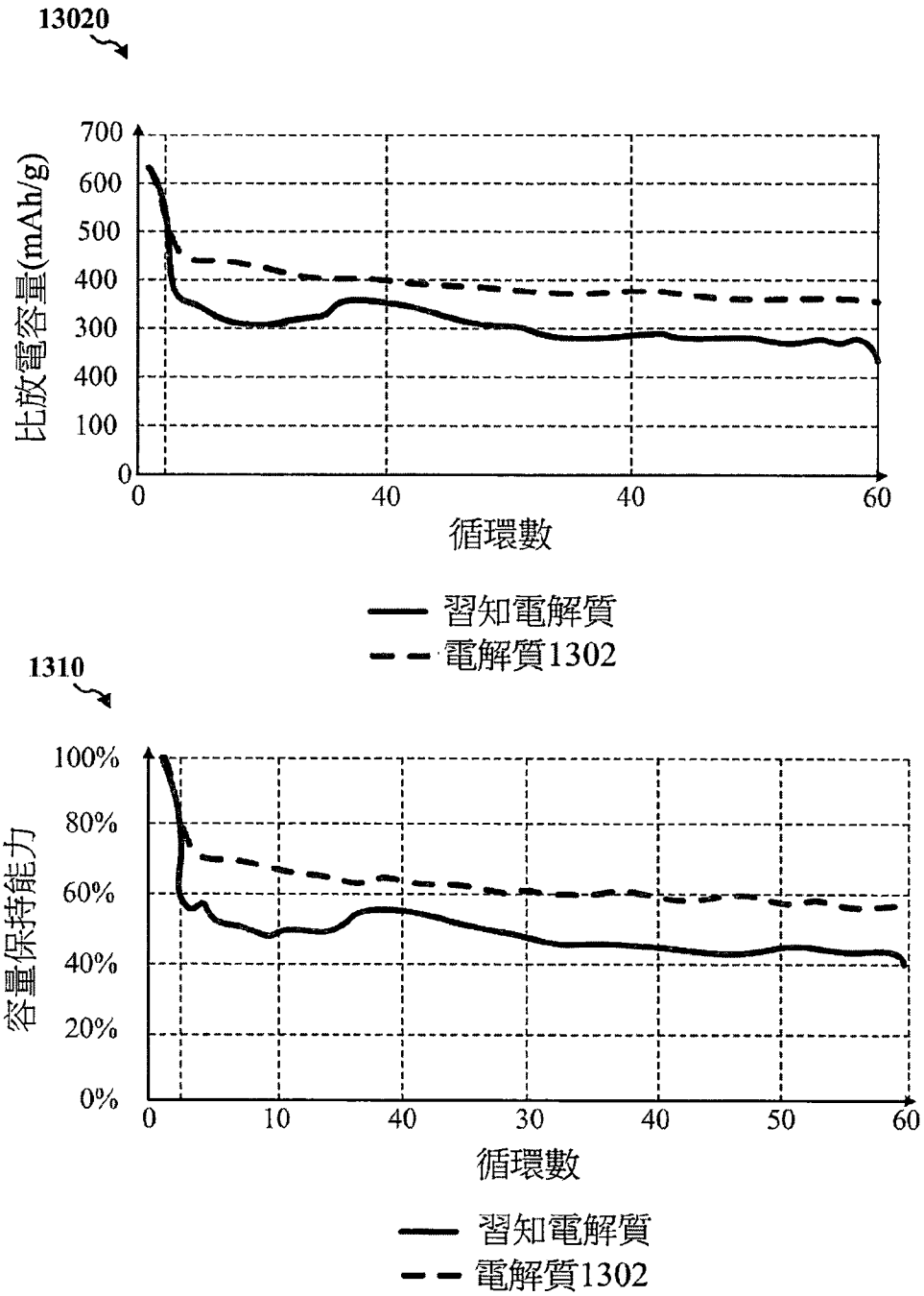
[도면 10B]


1100
1110
1120
1130
1111
1112
1113
孔隙率類型 I
孔隙率類型 II
孔隙率類型 III
孔隙類型
孔徑
硫位置
1
<5 nm
S1
2
5-50 nm
S2
3
>50 nm
S3

【圖 11】

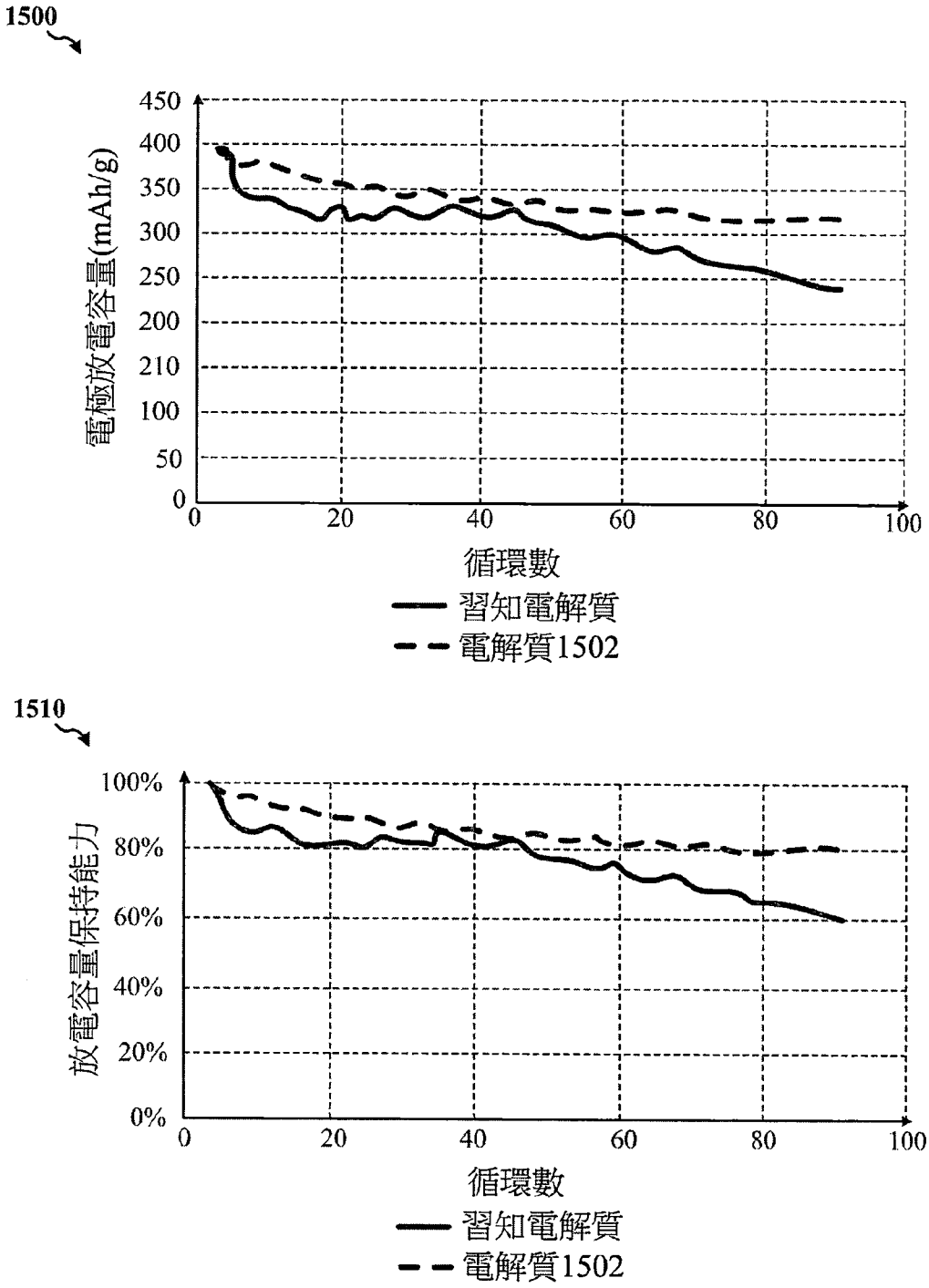

累計孔隙體積% (孔隙< 40nm)
0
20
40
60
80
100
孔隙寬度，nm
0
5
10
15
20
25
30
35
40
碳1(微孔)
碳2(中孔)
1200

【圖 12】

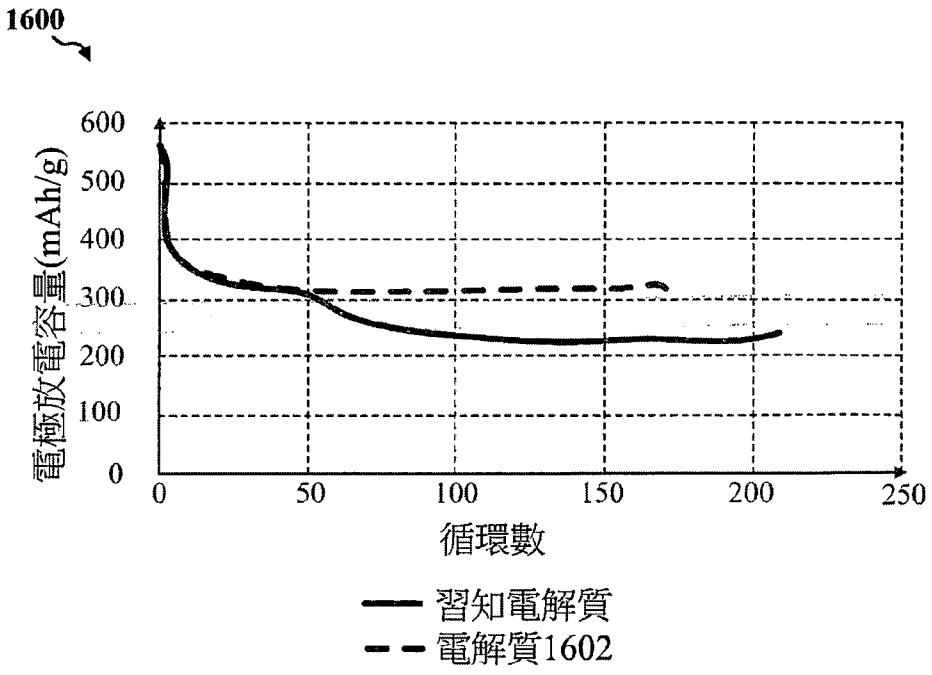

13020
700
600
500
400
300
400
100
0
比放電容量(mAh/g)
0
40
40
60
循環數
習知電解質
電解質1302
1310
100%
80%
60%
40%
20%
0%
容量保持能力
0
10
40
30
40
50
60
循環數
習知電解質
電解質1302

【圖 13】

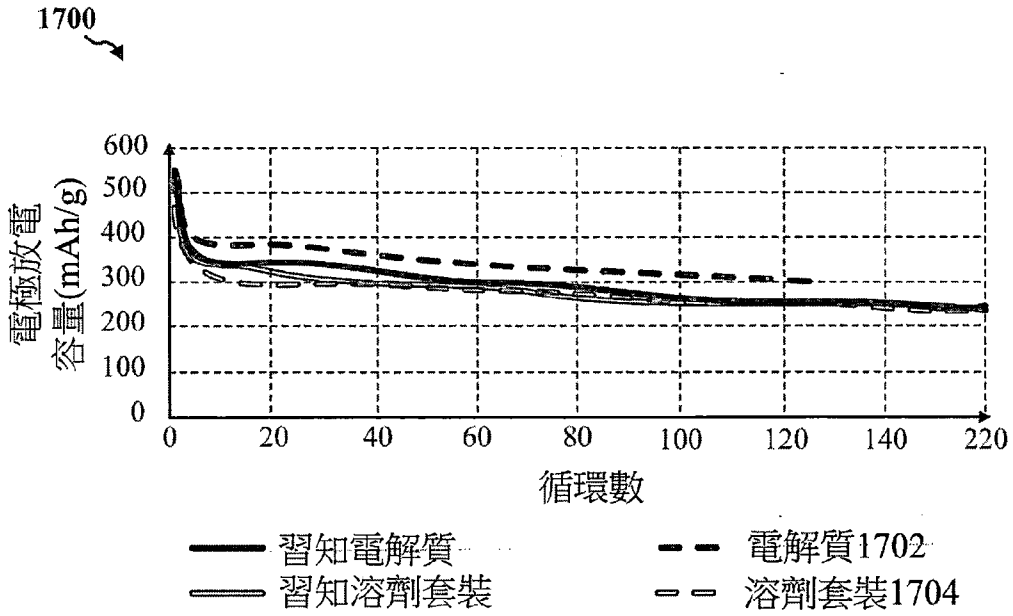
A
B
C
D
E
F
G
H
I
J
K
L
M
N
O
P
Q
R
S
T
U
V
W
X
Y
Z
AA
AB
AC
AD
AE
AF
AG
AH
AI
AJ
AK
AL
AM
AN
AO
AP
AQ
AR
AS
AT
AU
AV
AW
AX
AY
AZ
BA
BB
BC
BD
BE
BF
BG
BH
BI
BJ
BK
BL
BM
BN
BO
BP
BQ
BR
BS
BT
BU
BV
BW
BX
BY
BZ
CA
CB
CC
CD
CE
CF
CG
CH
CI
CJ
CK
CL
CM
CN
CO
CP
CQ
CR
CS
CT
CU
CV
CW
CX
CY
CZ
DA
DB
DC
DD
DE
DF
DG
DH
DI
DJ
DK
DL
DM
DN
DO
DP
DQ
DR
DS
DT
DU
DV
DW
DX
DY
DZ
EA
EB
EC
ED
EE
EF
EG
EH
EI
EJ
EK
EL
EM
EN
EO
EP
EQ
ER
ES
ET
EU
EV
EW
EX
EY
EZ
FA
FB
FC
FD
FE
FF
FG
FH
FI
FJ
FK
FL
FM
FN
FO
FP
FQ
FR
FS
FT
FU
FV
FW
FX
FY
FZ
GA
GB
GC
GD
GE
GF
GG
GH
GI
GJ
GK
GL
GM
GN
GO
GP
GQ
GR
GS
GT
GU
GV
GW
GX
GY
GZ
HA
HB
HC
HD
HE
HF
HG
HH
HI
HJ
HK
HL
HM
HN
HO
HP
HQ
HR
HS
HT
HU
HV
HW
HX
HY
HZ
IA
IB
IC
ID
IE
IF
IG
IH
II
IJ
IK
IL
IM
IN
IO
IP
IQ
IR
IS
IT
IU
IV
IW
IX
IY
IZ
JA
JB
JC
JD
JE
JF
JG
JH
JI
JJ
JK
JL
JM
JN
JO
JP
JQ
JR
JS
JT
JU
JV
JW
JX
JY
JZ
KA
KB
KC
KD
KE
KF
KG
KH
KI
KJ
KK
KL
KM
KN
KO
KP
KQ
KR
KS
KT
KU
KV
KW
KX
KY
KZ
LA
LB
LC
LD
LE
LF
LG
LH
LI
LJ
LK
LL
LM
LN
LO
LP
LQ
LR
LS
LT
LU
LV
LW
LX
LY
LZ
MA
MB
MC
MD
ME
MF
MG
MH
MI
MJ
MK
ML
MM
MN
MO
MP
MQ
MR
MS
MT
MU
MV
MW
MX
MY
MZ
NA
NB
NC
ND
NE
NF
NG
NH
NI
NJ
NK
NL
NM
NN
NO
NP
NQ
NR
NS
NT
NU
NV
NW
NX
NY
NZ
OA
OB
OC
OD
OE
OF
OG
OH
OI
OJ
OK
OL
OM
ON
OO
OP
OQ
OR
OS
OT
OU
OV
OW
OX
OY
OZ
PA
PB
PC
PD
PE
PF
PG
PH
PI
PJ
PK
PL
PM
PN
PO
PP
PQ
PR
PS
PT
PU
PV
PW
PX
PY
PZ
QA
QB
QC
QD
QE
QF
QG
QH
QI
QJ
QK
QL
QM
QN
QO
QP
QQ
QR
QS
QT
QU
QV
QW
QX
QY
QZ
RA
RB
RC
RD
RE
RF
RG
RH
RI
RJ
RK
RL
RM
RN
RO
RP
RQ
RR
RS
RT
RU
RV
RW
RX
RY
RZ
SA
SB
SC
SD
SE
SF
SG
SH
SI
SJ
SK
SL
SM
SN
SO
SP
SQ
SR
SS
ST
SU
SV
SW
SX
SY
SZ
TA
TB
TC
TD
TE
TF
TG
TH
TI
TJ
TK
TL
TM
TN
TO
TP
TQ
TR
TS
TT
TU
TV
TW
TX
TY
TZ
UA
UB
UC
UD
UE
UF
UG
UH
UI
UJ
UK
UL
UM
UN
UO
UP
UQ
UR
US
UT
UU
UV
UW
UX
UY
UZ
VA
VB
VC
VD
VE
VF
VG
VH
VI
VJ
VK
VL
VM
VN
VO
VP
VQ
VR
VS
VT
VU
VV
VW
VX
VY
VZ
WA
WB
WC
WD
WE
WF
WG
WH
WI
WJ
WK
WL
WM
WN
WO
WP
WQ
WR
WS
WT
WU
WV
WW
WX
WY
WZ
XA
XB
XC
XD
XE
XF
XG
XH
XI
XJ
XK
XL
XM
XN
XO
XP
XQ
XR
XS
XT
XU
XV
XW
XX
XY
XZ
YA
YB
YC
YD
YE
YF
YG
YH
YI
YJ
YK
YL
YM
YN
YO
YP
YQ
YR
YS
YT
YU
YV
YW
YX
YY
YZ
ZA
ZB
ZC
ZD
ZE
ZF
ZG
ZH
ZI
ZJ
ZK
ZL
ZM
ZN
ZO
ZP
ZQ
ZR
ZS
ZT
ZU
ZV
ZW
ZX
ZY
ZZ


1500
450
400
350
300
250
200
210
100
50
0
電極放電容量(mAh/g)
0
20
40
60
80
100
循環數
習知電解質
電解質1502
1510
100%
80%
60%
40%
20%
0%
放電容量保持能力
0
20
40
60
80
100
循環數
習知電解質
電解質1502

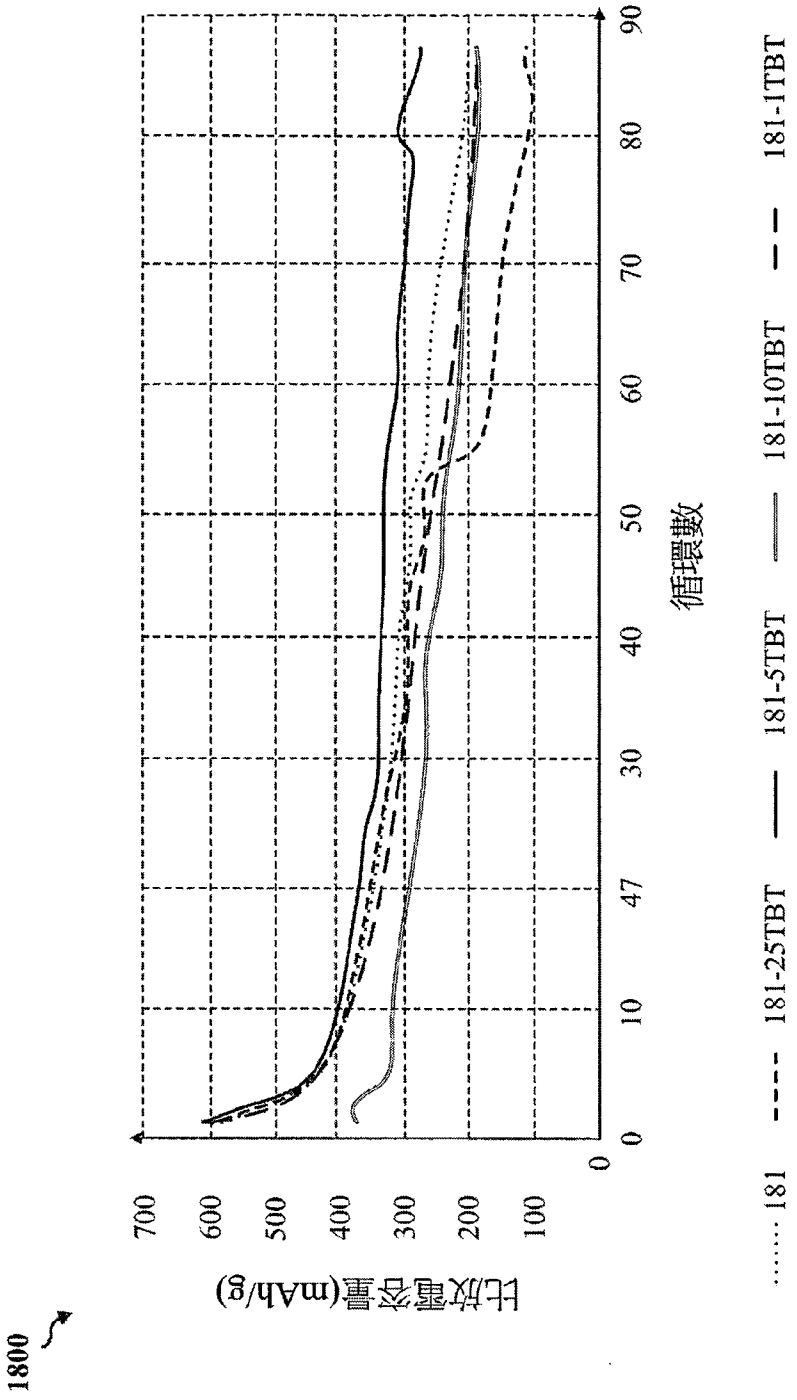
【圖 15】


1600
600
500
400
300
200
100
0
電極放電容量(mAh/g)
0
50
100
150
200
250
循環數
習知電解質
電解質1602

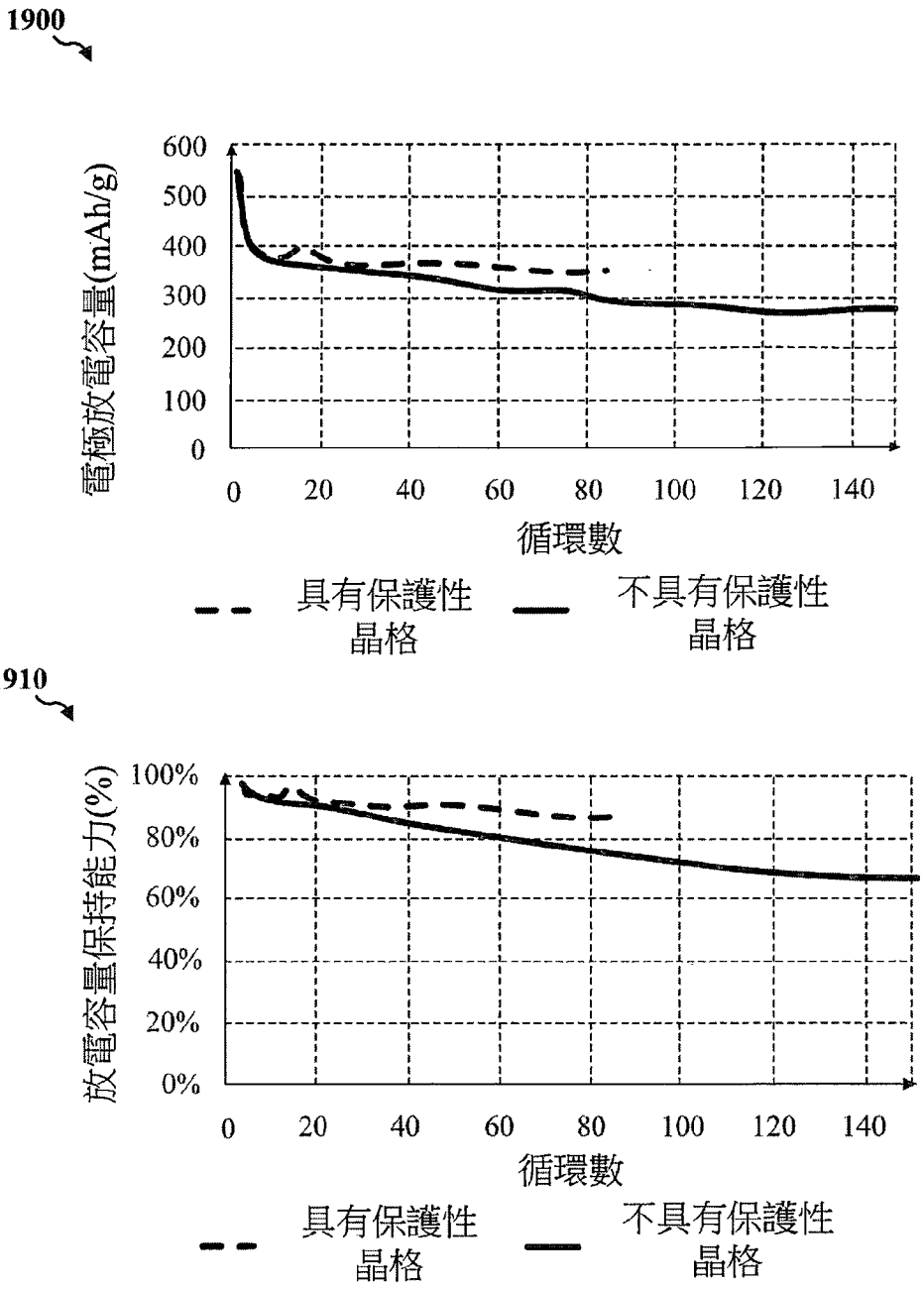
【圖 16】


1700
600
500
400
300
200
100
0
電極放電
容量(mAh/g)
0
20
40
60
80
100
120
140
220
循環數
習知電解質
電解質1702
習知溶劑套裝
溶劑套裝1704

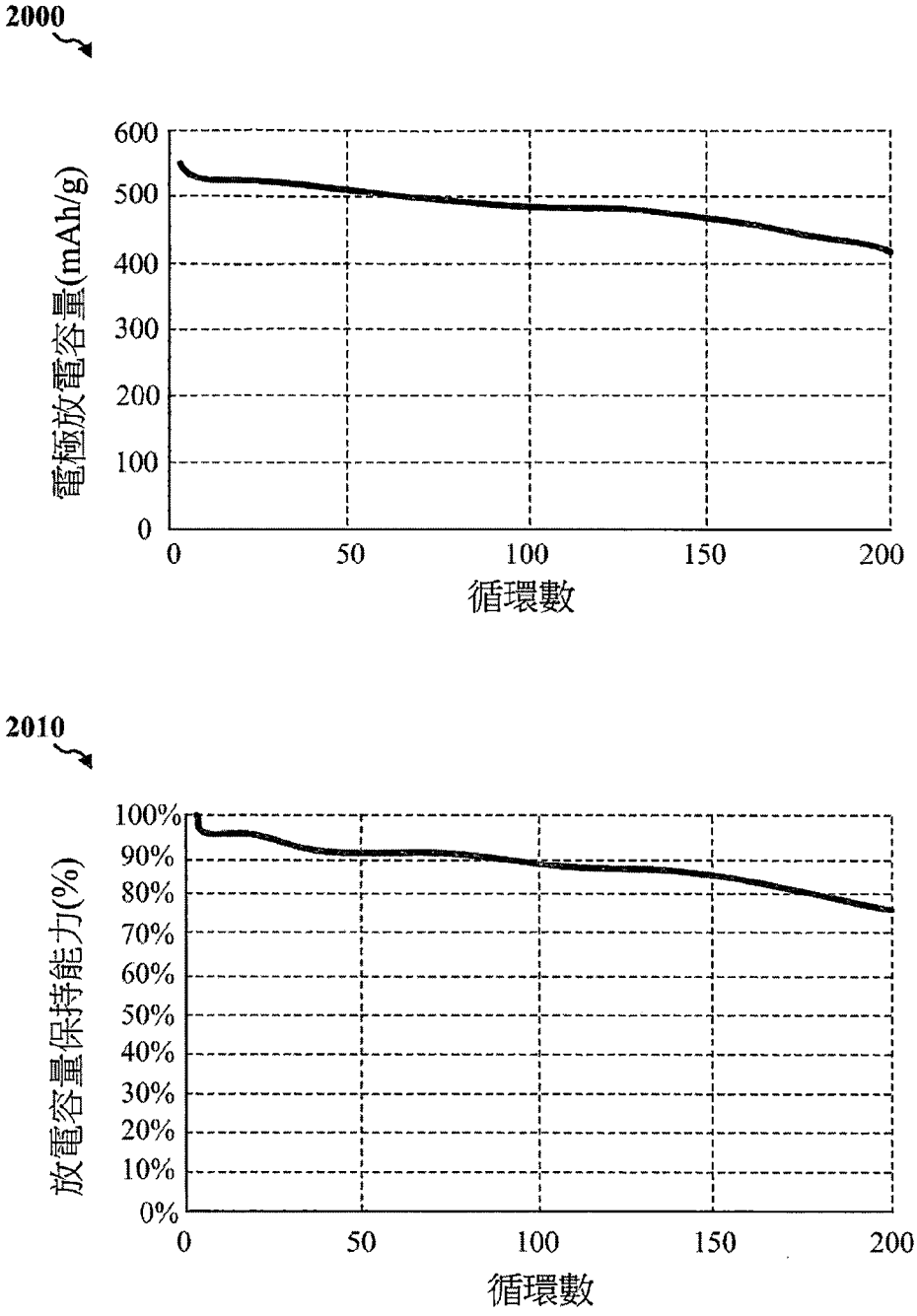
【圖 17】


1800
比放電容量(mAh/g)
700
600
500
400
300
200
100
0
0
10
47
30
40
50
60
70
80
90
循環數
181
181-25TBT
181-5TBT
181-10TBT
181-1TBT

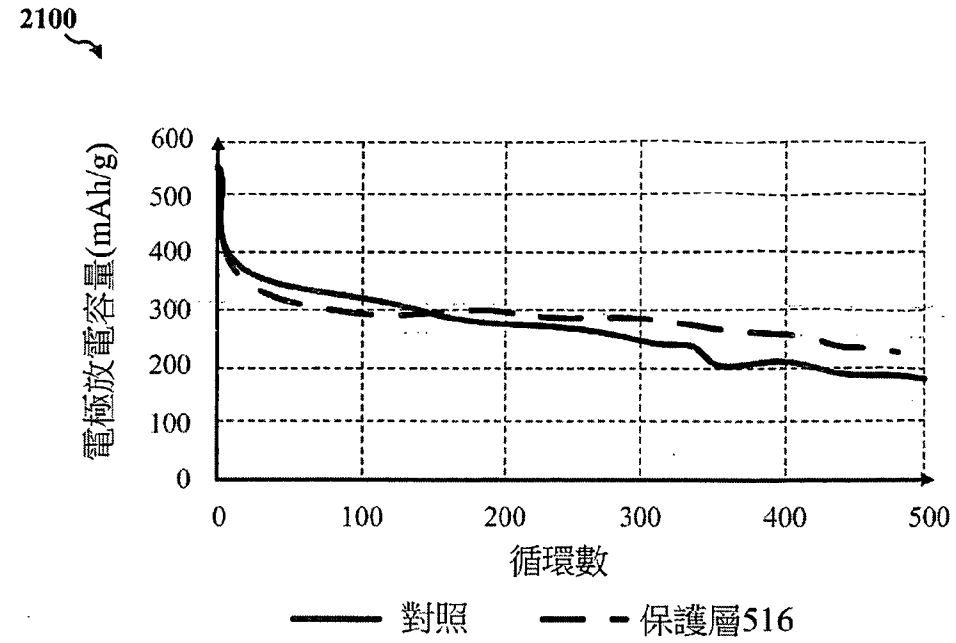
【圖 18】

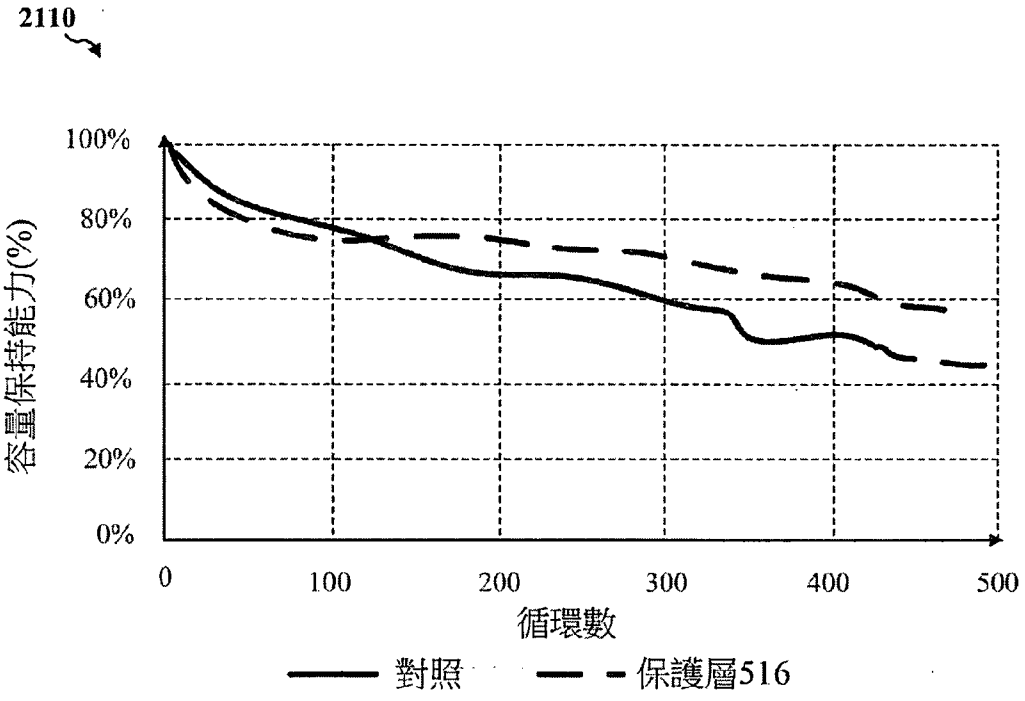

1900
600
500
400
300
200
100
0
電極放電容量(mAh/g)
0
20
40
60
80
100
120
140
循環數
具有保護性晶格
不具有保護性晶格
1910
100%
80%
60%
40%
20%
0%
放電容量保持能力(%)
0
20
40
60
80
100
120
140
循環數
具有保護性晶格
不具有保護性晶格

【圖 19】

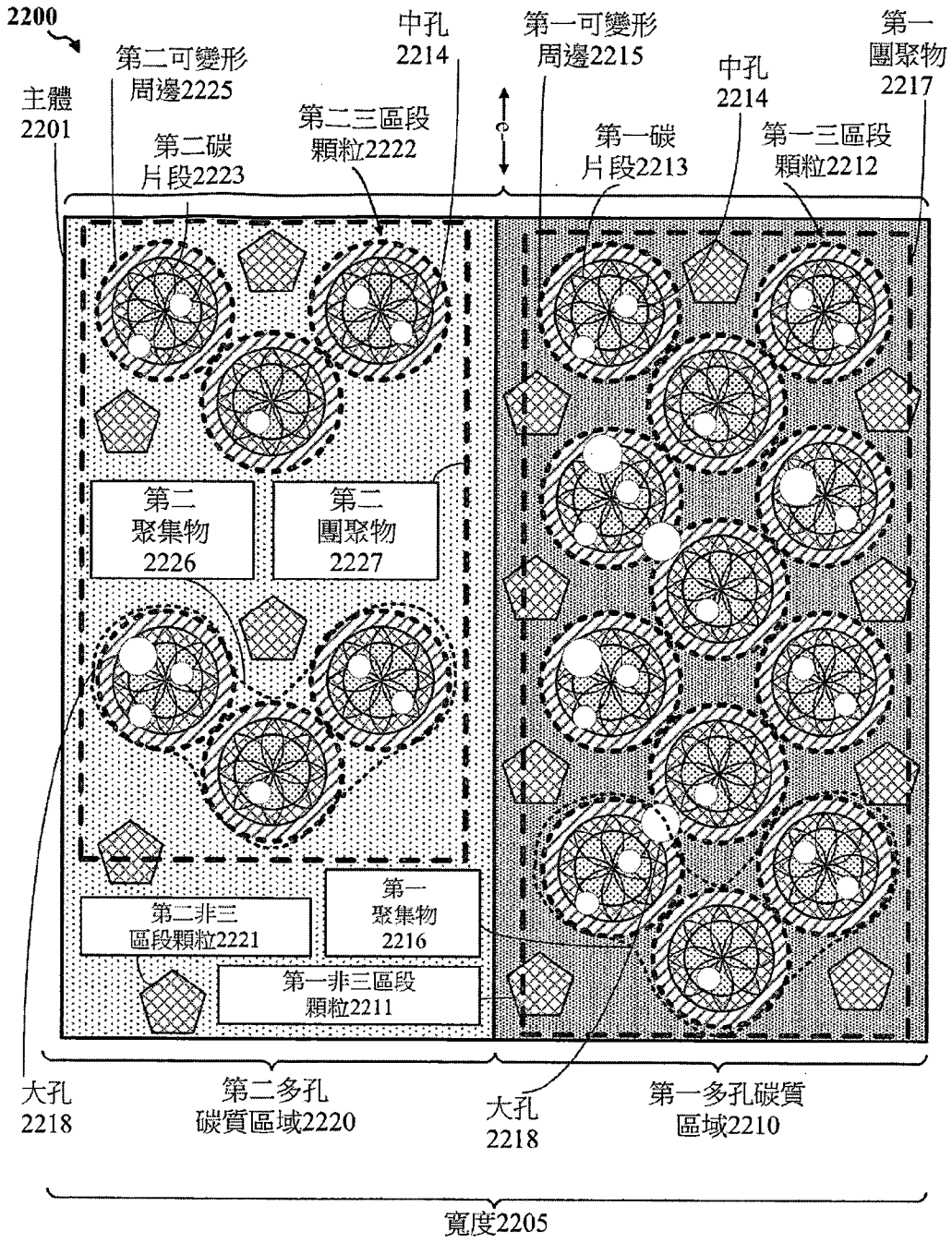

2000
600
500
400
300
200
100
0
電極放電容量(mAh/g)
0
50
100
150
200
循環數
2010
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
放電容量保持能力(%)
0
50
100
150
200
循環數

【圖 20】


2100
600
500
400
300
200
100
0
電極放電容量(mAh/g)
0
100
200
300
400
500
循環數
對照
保護層516


2110
100%
80%
60%
40%
20%
0%
容量保持能力(%)
0
100
200
300
400
500
循環數
對照
保護層516

【圖 21】


2200
主體
2201
第二可變形
周邊2225
第二碳
片段2223
中孔
2214
第二三區段
顆粒2222
第一可變形
周邊2215
第一碳
片段2213
中孔
2214
第一三區段
顆粒2212
第一
團聚物
2217
第二
聚集物
2226
第二
團聚物
2227
第二非三
區段顆粒2221
第一
聚集物
2216
第一非三區段
顆粒2211
大孔
2218
第二多孔
碳質區域2220
大孔
2218
第一多孔碳質
區域2210
寬度2205

【圖 22】