

知識物件上傳表

計畫名稱：液流電池系統及儲能綠能應用研發計畫

上傳主題：全釩液流電池隔離膜之介紹與分析

提報者與機構：林漢洲/許寧逸/行政院原子能委員會核能研究所

提報時間：110 年 3 月 8 日

與計畫相關	☒ 1. 是 ☐ 2. 否
國別	☐ 1. 國內 2. ☒ 國外
能源業務	☐ 1. 能源政策(包含政策工具及碳交易、碳稅等) ☐ 2. 石油及瓦斯 ☐ 3. 電力及煤碳(包含電力供應、輸配、煤炭、核能等) ☒ 4. 新及再生能源 ☐ 5. 節約能源(包含工業、住商、運輸等部門) ☐ 6. 其他
能源領域	☐ 1. 能源總體政策與法規 ☐ 2. 能源安全 ☐ 3. 能源供需 ☐ 4. 能源環境 ☐ 5. 能源價格 ☐ 6. 能源經濟 ☒ 7. 能源科技 ☐ 8. 能源產業 ☐ 9. 能源措施 ☐ 10. 能源推廣 ☐ 11. 能源統計 ☐ 12. 國際合作
決策知識類別	☐ 1. 建言(策略、政策、措施、法規) ☐ 2. 評析(先進技術或方法、策略、政策、措施、法規) ☒ 3. 標竿及統計數據：技術或方法、產業、市場等趨勢分析 ☐ 4. 其他：
重點摘述	由於間歇性可再生能源的供應不斷增加，電池儲能系統對於滿足用能高峰時的大量需求變得越來越重要。其中，全釩液流電池(VRB)系統的可擴展性和穩定性使其前景廣闊，因而吸引了人們的注意力。隔離膜是釩液流電池致命弱點之一，因為它的成本很高。隔離膜暴露於高氧化性的釩電解質和酸性環境下會導致膜變質。此外，選擇性較差的隔離膜易造成釩滲透而導致電池的更快放電時間。目前使用的高成本隔離膜實質上導致了釩液流電池系統價格上升；因此，通過使用替代材料來降低隔離膜的成本可以顯著降低總電池成本，從而增加了釩液流電池在工業上的應用前景。以下針對不同類型的隔離膜進行了綜述，並分析了影響膜性能的因素。

隔離膜是 VRB 中昂貴的組件，在高電流密度下，其使用壽命和有限的傳導率會對 VRB 系統產生不利影響。目前，商用全氟化聚合物離子交換膜（即 Nafion）是最廣泛使用的膜，因為它們在 VRB 的酸性和氧化性電解質溶液中具有高的離子傳導性和穩定性。由於其高成本和鈦離子易滲透使得較低成本的多孔膜成為工業 VRB 應用上更有希望的替代品。多孔膜的主要問題是在較高電流密度下其較低的電壓效率(voltage efficiency, VE)，這與膜的離子傳導率有關。通常較大的孔徑、較高的孔互連性、較低的厚度和較高的親水性有助於較高的離子傳導率。但是，在高離子傳導率和選擇性之間需要權衡。在膜上進行改進以提高電壓效率時，也不應在電流密度提高時犧牲其庫倫效率(columbic efficiency, CE)。

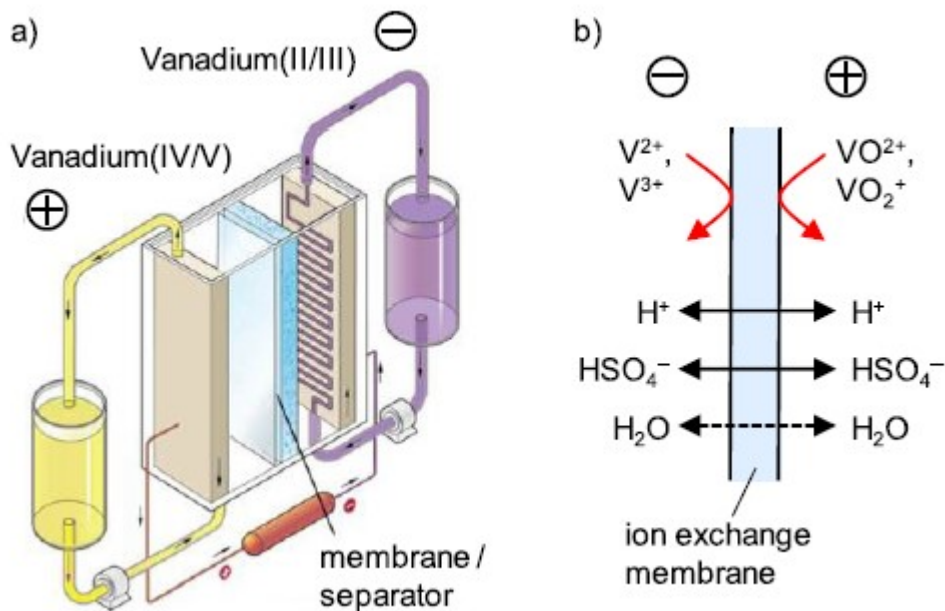


圖 1. a 鈦液流電池示意圖與 b 隔離膜的傳輸特性

一、隔離膜的種類：

1. 陽離子交換膜(Cationic exchange membranes, CEM)

在 80 年代早期膜由充滿孔洞的離子交換膜 (IEM) 組成。在這些類型的膜中，多孔載體填充有離子交換樹脂或聚電解質(polyelectrolyte)和交聯劑，然後將混合物固化以獲得交聯反應。因此製備的早期膜是磺化的多孔聚乙烯和聚苯乙烯材料。但在 VRB 的早期研究中，揭示了將各種材料用作為 VRB 膜時的種種問題，

例如，較高的鈳離子滲透率造成可以自我放電或者在化學上不穩定可能隨著時間的流逝會變得非常脆導致破裂等。因此，在開發膜材料時應仔細考慮各種參數：i) 滲透速率應低，以防止自放電； ii) 潤濕性應高，電阻率應低，以便能夠氫離子通過膜的運輸 iii) 膜的穩定性。Seleion 和 Nafion 膜具有適合 VRB 應用的特性。但是，Nafion 膜的長期穩定性受到限制且 Nafion 的主要缺點是價格高。為了克服早期膜的缺點，下面對各種材料進行了廣泛的研究。

a. 聚乙烯膜(Polyethylene based membranes)

聚乙烯材料中的質子傳導性通常是通過引入磺酸基作為陽離子交換位而產生的。膜孔的性質也可以通過引入各種類型的聚合物來改變，這使得能夠使用更便宜的載體材料，同時孔可以被 Nafion 型聚合物填充，這樣可以降低材料成本。這種便宜的可商購的膜載體的例子是 Daramic，它是一種高分子聚乙烯，具備了出色的強度。此外，與其他市售膜（例如 Seleion）相比，該材料具有較高的抗氧化性。但是，在 VRB 應用中未經處理時，Daramic 的大孔會導致較差的膜選擇性。為了增加膜的選擇性，可以在聚合物中填充孔，從而在 VRB 應用中有高傳導率和膜選擇性。在 2013 年，提出了另一種基於微孔 PE 的膜。其中，PE 膜載體的孔被聚 4-乙基苄基氯（VBC）填充；與 Nafion 117 相比，摻入 10 wt. % 的 VBC 導致鈳的滲透率降低了 48%，但面積電阻率卻差不多。這種類型的膜進行離子交換時，在高質子穿透和低鈳離子滲透擴散方面顯示出良好的選擇性，EE 比 Nafion 117 的 EE 高 5.4%。

b. 氟碳膜(Fluorocarbon based membranes)

目前應用於 VRB 應用以及燃料電池中的膜主要基於氟化碳骨架聚合物，因這種材料在 VRB 電池的氧化條件下的具備高化學穩定性。由杜邦公司生產的 Nafion 和 Nafion 117 由碳氟化合物聚合物製成，該碳氟化合物聚合物由疏水基鐵氟隆主鏈和親水性側鏈組成，並具有磺酸基。聚合物名稱（例如，Nafion 117）中的數字表示 Nafion 膜的當量重量和厚度，較厚的膜導致較低的鈳離子滲透性，從而改善了 CE 和自放電率。但是，當用於分離 VRB 中的電解質時，未經處理的 Nafion 膜本身容易產生大量鈳離子交換。

c. Nafion 高分子複合膜(Nafion based polymeric composite membranes)

通過用更便宜的替代品交換部分 Nafion 材料，可以降低成本。例如:通過將 5wt. % 的 Nafion 水溶液浸漬到便宜的微孔聚乙烯 Daramic 膜中的方法。與原來的 Daramic 膜相比，浸漬材料顯示出減少的水吸收和較低的鈳滲透性，從而導致較低的自放電。降低 Nafion 材料成本的另一個例子是將聚醚酮 SPEEK 膜與 Nafion 膜層壓在一起。儘管 SPEEK 具有出色的傳導性能，但在氧化 VO^{2+} 環境中其化學穩定性較差。通過用高度穩定的 Nafion 層覆蓋 SPEEK 材料，可以在不損失 VRB 應用性能的前提下保護該材料。

近來，市售的 Nafion 混合膜如 VANADion，在這種複合膜中，Nafion 115 的薄層與多孔層結合在一起。複合材料的非 Nafion 部分由多孔層組成，該多孔層具有高質子傳導性，當與強酸接觸時會進一步提高。緻密的 Nafion 膜部分用作抗鈳膜，降低了鈳滲透性。在 VRB 應用中其結果顯示，與 Nafion 115 (76.2%) 相比，VANADion 材料顯示出更高的 EE (71.3%)

d. Nafion 無機複合膜(Nafion based inorganic hybrid membranes)

Nafion 的表面由膜中的極性叢集組成，從而增強了鈳離子交叉滲透；通過使用無機奈米粒子填充這些極性叢集，使得極性奈米叢集被封閉而降低鈳離子交叉滲透。例如，Nafion 117 膜用 SiO_2 溶膠-凝膠(Sol-Gel)處理，以填充 Nafion 膜的極性叢集，其結果為，複合 Nafion / SiO_2 膜的 IEC 和質子傳導性得以保留，但與 Nafion 117 (CE = ~92%; EE = ~74%) 相比，鈳交叉滲透顯著降低，從而導致較高的 CE (~93%) 和 EE (~80%) 和較低的自我放電率。用四乙氧基矽烷 (TEOS) 和二甲基二乙氧基矽烷 (DEDMS) 代替溶膠-凝膠二氧化矽前體，形成 Nafion / ORMOSIL 膜；與 Nafion 和 Nafion / SiO_2 膜相比，這種 ORMOSIL 膜的效率更高 (CE = ~96%; EE = 88%)，並且自放電率進一步降低，這些性能的改善歸因於該複合膜的改善了鈳離子阻斷特性。

2. Nafion 表面聚合(Nafion surface polymerization)

在 Nafion 上層壓聚合物層或沉積聚電解質是降低鈳離子滲透性的一種替代方法，但這樣的系統也容易使膜膨脹(swelling)。膨脹是有害的，因為它導致膜壽命的縮短。為了減少膨脹，可以通過界面聚合在 Nafion 表面的頂部上生長聚

電解質聚亞胺層。這樣可以在 Nafion 表面上形成牢固陽離子帶電層。作為排斥層的結果，該膜顯示出較低的鈳離子滲透速率，但具有較高的面積電阻。由於較低的滲透性，該膜顯示較少的水轉移並降低了自放電速率。

石墨烯材料由於其高導電性，機械強度和阻隔性能而在近幾十年來引起了人們的關注。通過在與 Nafion 的混合物中引入氧化石墨烯 (GO)，然後進行旋塗，可以形成取向良好且具有高阻擋層效應的材料，從而防止鈳離子越過。由於降低的滲透性，與原始的 Nafion 膜相比，GO / Nafion 膜獲得了更高的 CE 和 EE，這歸因於其改進的阻隔性能。由於 GO 的導電特性，質子傳導得以保留。

3. 聚芳醚膜(Poly aryl ether membranes)

替代 Nafion 的一種有前途的廉價膜材料是使用磺化芳香基主鏈聚合物，例如 SPEEK, SPES 和 SPESK，這些材料具有良好的熱和機械穩定性以及質子傳導性，可以通過引入磺酸，咪唑(imidazole)和四級銨基團輕鬆實現，其價格合理，離子傳導性好，機械性能強，因此適合 VRB 應用。這些材料的質子傳導率取決於磺化程度，磺化度越高，SPEEK 膜可能會吸收更多的水導致膨脹，從而導致更高的鈳離子滲透性和膜氧化。然而，與 Nafion 膜相比，這些膜具有較低的鈳離子滲透率，這歸因於 Nafion 膜中的通道比磺化烴膜中的通道更連續。SPEEK 膜的致命弱點是由於在較大的親水區域吸收大量水而易於膨脹；此外，芳香基醚鍵易於氧化降解。

a. 有機複合聚芳醚膜(Organic hybrid polyarylether membranes)

由於高度磺化會降低膜的穩定性和 VRB 的性能，為了增加化學穩定性，因此研究了聚合物膜材料與 SPEEK 的組合以形成複合膜。最早的混合 SPEEK 膜之一是與 Nafion 的複合材料，使用 SPEEK 作為填充材料會大大地降低膜的價格並降低鈳離子滲透率，而在 SPEEK 表面上使用 Nafion，因其抗氧性能和質子傳導性而提高了化學穩定性。

將 SPEEK 單體與不易膨脹的聚合物單體（如磺化聚醚砜(sulfonated poly(ethersulfone))) 共混也可以提高材料的穩定性，但仍具有 SPEEK 的優勢，例如高電導率。 SPES / SPEEK 膜顯示出很強的機械強度，高吸水率和低鈳離子

滲透性，這些性質歸因於由於將 SPES 摻入 SPEEK 基質而導致的較低程度的膨脹。與 Nafion 212 相比，此 SPES / SPEEK 混合膜的 CE 和 EE 更高（CE：98%對 91%，EE 84%對 79.5%）。當應用於 VRB 時，系統顯示出較低的充電容量損失。即使經過 100 個週期，CE 和 EE 也沒有顯著下降。

b. 聚芳醚交聯(Polyarylether crosslinking)

如前所述，與 PTFS 材料（如 Nafion）相比，烴膜（如 SPEEK）更容易膨脹。因此 SPEEK 膜在通過膜擴散時更容易與 VO^{2+} 發生醚鍵氧化。為減少 SPEEK 膜膨脹並改善機械穩定性的一種方法是在聚合物鏈之間引入交聯從而形成共價鍵。交聯的引入可以通過在單體中引入官能團來完成，該官能團隨後可以被活化以形成鏈間交聯。例如 SPEEK 與 SPEEK 主鏈中的二烯丙基雙酚 A 基團的交聯，烯丙基通過 UV 聚合進行交叉聚合，結果是磺化的聚（二烯丙基雙酚醚酮）（SDPEEK）膜。與 Nafion 115 鈳離子滲透性（ $1.04 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ ）相比，在高磺化度（80%）其鈳離子滲透性仍大大降低（ $2.4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ ）。

c. 聚芳醚石墨烯複合材料(Polyarylether graphene hybrid materials)

氧化石墨烯因其機械強度（僅一個或幾個碳原子的厚度）、高電導率和出色的阻隔性能而成為令人感興趣的材料。例如，該材料在 $200 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的電流密度下的 CE 值為 97%，而 Nafion 117 的 CE 為 94%。該複合膜還具有比 SPEEK 和 Nafion 117 低得多的滲透性，由於較低的滲透性，該膜在 VRB 條件下不易降解。

d. 複合有機/無機磺化聚芳醚膜(Hybrid organic/inorganic sulfonated polyarylether membranes)

無機填料的使用可以通過形成動態交聯而對這種複合膜的性能產生有益的影響。這種相互作用的結果是，質子傳導性，機械性質和鈳的滲透性特性可能得到改善。例如將 $\text{H}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ 或 WO_3 引入 SPEEK 材料的有益效果為改善的質子傳導性和降低的鈳離子滲透性。SPEEK / $(\text{WO}_3)_x$ 複合膜的離子選擇性比 Nafion 高出三倍以上，分別為 $2.1 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{min} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $6.5 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{min} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。另外，將最有前途的 SPEEK / $(\text{WO}_3)_x$ 膜（具有最佳 NPs 濃度）安裝在現實條件下運行的 VRB 電池中，與使用 Nafion 212 膜運行的系統相比，CE 和可循環性得到了改善。改善的傳導

率歸因於膜材料中更好連接的通道的形成。滲透率的降低歸因於膜的交聯增加，從而減小了親水域的尺寸，從而導致較少的水吸收，最終導致較少的膜膨脹。

以上討論的有關陽離子交換膜的描述了在 VRB 應用中改善陽離子膜性能的方法。陽離子交換膜由於與鈦離子電解質的相互作用而易受影響，從而導致電池放電並降低膜壽命。最有前途的方法是基於用無機奈米粒子氧化石墨烯處理商業膜；VRB 膜科學的當前標準是 Nafion 117，但它傾向於具有高的鈦離子滲透性和高成本。為了降低膜成本，研究了膜材料的組合，例如 Nafion / SPEEK 混合材料；另一種有希望的方法是使用相對便宜的膜，例如聚乙烯和聚丙烯，並用高導導性和不易滲透鈦離子的聚合物或 Nafion 型聚合物填充孔。

4. 陰離子交換膜(Anionic exchange membranes, AEM)

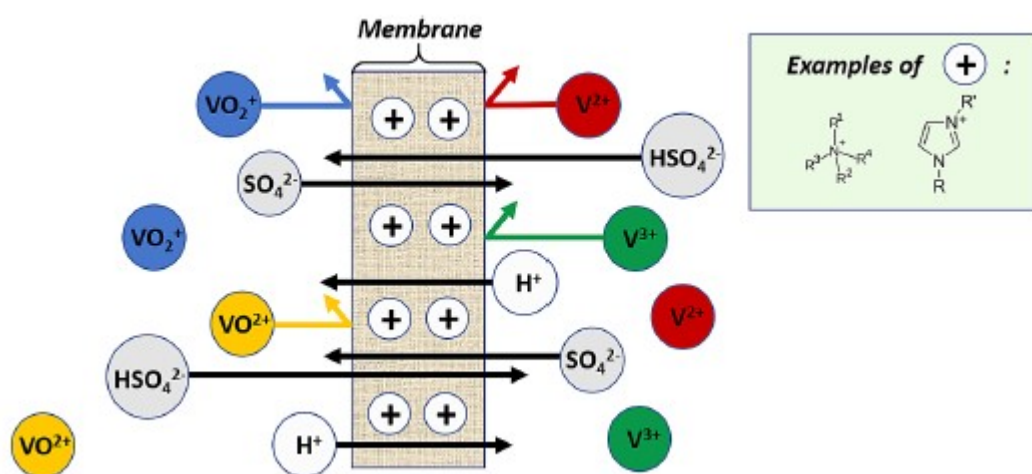


圖 2 陰離子交換膜示意圖

由於其帶正電的官能團，它們從膜上排斥帶正電的鈦離子物質（圖 2），此效應也稱為 Donnan 效應。儘管 AEM 的低鈦離子滲透率很受關注，但它們在 VRB 應用中的存在缺點，AEM 顯示出降低的質子傳導性以及較差的化學穩定性，從而阻礙了 VRB 的商業應用。在 AEM 中通常觀察到比 CEM 高的 SO_4^{2-} 和 HSO_4^- 滲透性，從而導致優先通過膜的水轉移。而且防止膜的陰離子基團降解仍然具有挑戰性，幾項研究已經研究了 AEM 降解的機理，發現這些膜的穩定性在很大程度上受聚合物

主鏈的分子結構和官能團的影響。

聚苯並咪唑 (polybenzimidazole, PBI) 陰離子膜在 VRB 膜中的應用引起了人們的高度關注。PBI 其高度化學穩定的骨架可以承受 VRB 的高度酸性和氧化性條件，且 PBI 的孔徑狹窄有助於降低鈳離子的滲透率。雖 PBI 材料本身不導電，但可以與酸（例如硫酸）相互作用，也稱為酸摻雜膜。PBI 材料在 VRB 條件下非常穩定，而大多數非氟化烴由於與高電荷鈳離子反應而易於降解。當與 FAA3i 共混時，可以進一步提高 PBI 膜的電導率，FAA3i 是一種可商購的陰離子交換聚合物，由具備有季銨基團的聚苯醚鏈結構組成。當將 PBI 與 FAA3i 混合時，CE 將從 99.7 略微降低至 97.8%，而 VE 將從 5.7% 顯著增加至 88.22%，當添加更多 FAA3i 時，EE 會更高達到 86.2%（在 $80 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 時）。

陰離子交換膜 (AEM) 的應用具有 VRB 應用的巨大潛力。特別是由於帶正電的官能團，對鈳離子的高度排斥性而大大降低了鈳離子的滲透性。與 CEM 相比，官能性陽離子帶電基團的低穩定性會導致相對較低的壽命。因此大量的研究注意力轉移到改善這些基團的穩定性上，這可以通過改變聚合物膜的分子結構來實現。通過改變化學環境，試圖增加空間位阻，從而減少 AEM 中陽離子基團的氧化。

5. 兩性離子交換膜 (Amphoteric ion-exchange membranes, AIEM)

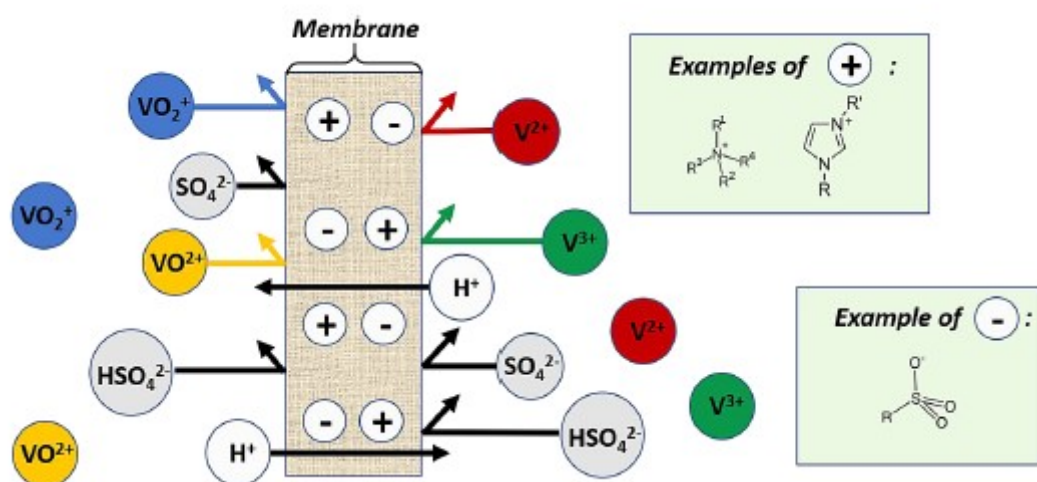


圖 3 兩性離子交換膜示意圖

兩性離子交換膜 (AIEM) 同時包含陰離子和陽離子交換基團，並提供 AEM 和 CEM 膜的特性 (圖 3)。CEM 具有更好的抗化學降解穩定性和較高的導電性能，而 AEM 則顯示出較低的鈳離子交叉滲透速率。但由於鈳離子、 SO_4^{2-} 和 HSO_4^- 種類的交換，兩種類型的膜都遭受通過膜的水轉移。通過同時引入 AEM 和 CEM，可以降低鈳離子和硫酸鹽物質的滲透性。

Nafion 材料容易受鈳離子滲透性的影響。通過將 Nafion 膜與帶正電的陽離子聚二烯丙基二甲基氯化銨 (PDDA) 和帶負電的聚苯乙烯磺酸鈉 (PSS) 陰離子交替吸附，在鈳離子和覆蓋表面的帶正電的聚電解質層之間存在靜電排斥力。實驗結果確實表明，與常規的 Nafion 膜相比，通過 Nafion-[PDDA-PSS]_n 膜轉移的鈳離子更少。結果，獲得了更高的庫倫效率和能量效率，以及較慢的自放電速率。

近年來，已經廣泛研究了基於聚芳醚的 AIEM 材料的製備和使用。與 Nafion 材料相似，SPEEK 膜的陽離子交換特性使其仍然易受鈳離子滲透性的影響。此外，親水特性使材料易於膨脹而增加了鈳離子的滲透性，導致芳基醚鍵被氧化。為了進一步降低鈳離子的滲透率，研究人員用咪唑官能化的聚砜 (polysulfone, PSf) 聚合物處理了 SPEEK 聚合物，從而形成了縮寫為 ImPSf / SPEEK 的兩性膜。PS 的添加減少了較大的親水區域，而咪唑官能團則引入了陰離子特性，從而引入了 Donnan 效應排斥鈳離子。將 ImPSf / SPEEK 膜的性能與 Nafion 212 的性能進行了比較。由於膜的低鈳離子滲透性，該電池可以保持 0.8 V 的 OCV 持續 43 小時，是 Nafion212 的 OCV (23 小時) 的兩倍。由於較低的滲透性，該膜的容量衰減率低於 Nafion212。ImPSf / SPEEK 膜的低面積電阻 ($0.48 \Omega \text{cm}^{-2}$) 與 Nafion212 ($0.41 \Omega \text{cm}^{-2}$) 相當。此外，即使在電流密度高達 200 mA cm^{-2} 的情況下，ImPSf / SPEEK 的效率 (CE = 97.5% 和 EE = 77.3%) 也比 Nafion 212 的效率 (CE = 92.4% 和 EE = 73.4%) 略高。膨脹在聚合物結合膜中可能是有問題的，但是咪唑鹽和磺酸基團之間的交聯阻止了這種兩性的 ImPSf / SPEEK 膜膨脹。

6. 沸石膜 (Zeolite membranes)

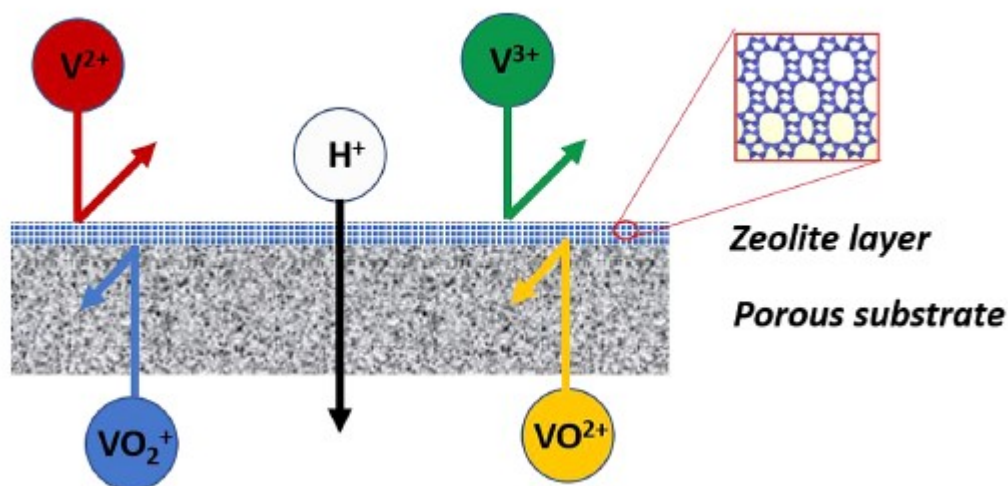


圖 4 沸石膜示意圖

沸石膜已被認為具有廣泛的應用，例如催化和分離。其分子結構由以四面體形式與氧原子配位的 Si 和 Al 組成，並以高度有序的方式構建，從而形成了多孔網絡。這些材料的高孔徑均勻性使這些材料適合於通過穿透分子的形狀和尺寸選擇進行分子分離。近來，在 VRB 中使用沸石作為膜已引起關注。例如以 α -氧化鋁基底上生長的沸石 T 作為膜在 VRB 中的應用，由於沸石內部的高質子濃度和低厚度，該材料顯示出高傳導率；此外，由於其孔徑（0.31 nm x 0.51 nm），該材料具有高度膜選擇性，所以有較低的鈮離子滲透性。

7. 多孔金屬有機骨架膜(porous MOF membranes)

像沸石一樣，金屬有機骨架（MOF）被認為是用於隔離膜的可行材料。由金屬離子和橋聯的有機配體組成的 MOF 具有很大的可變性，這是由於金屬和配體組合的多種可能性造成的，這為設計和調整 MOF 的化學和結構性質（例如孔徑，孔形狀，滲透性，選擇性和傳導率）提供了相當的可能性。官能機團通過與橋連有機配體形成共價鍵，這使其比沸石更容易在分子上控制官能機團。當 MOF 設計用於膜時，應同時考慮其的穩定性，疏水性/親水性，滲透性和傳導性。MOF 中的金屬-配體鍵結最容易水解，因此在較早期研究中 MOF 在水性化學環境中不穩定，金屬-配體鍵的脆弱性使得這些較早的 MOF 主要用於氣體分離而不是液液分離；然而，近年來已研究出了多種在水中穩定的 MOF，特別是作為固體電解質。與 MOF

相似的共價有機骨架 (COF) 由於具有高孔隙率，高度組織化的通道和增強的穩定性，因此在高級膜應用中是相當有吸引力的候選物。MOF 和相關多孔結構中的分子在吸附，運輸和分離方面的優異性能是由於它們在調節骨架及其孔的組成和幾何形狀方面具有無與倫比的靈活性。因此，它們仍然是電化學分離應用上的重要候選者。其大規模生產的成本，長期穩定性和循環壽命則仍有待解決。

二、結論

綜合以上各種製備用於鈮氧化還原液流電池隔離膜的方法所需考慮的種種因素，在開發新型膜材料時應考慮的重要因素是高傳導率，低鈮離子滲透率和高穩定性。高傳導率對於在下降電流密度下的充電放電循環期間保持下降電壓效率很重要。過去，由於磺酸基的引入而形成高傳導率，使得陽離子膜受到了廣泛的關注；但是與陰離子和兩性類型的膜相比，陽離子交換膜的缺點是其易於造成鈮離子滲透而造成放電時間縮短，且 VO^{2+} 離子進入膜中導致膜氧化，因而降低的機械強度和產生膨脹。由於 Donan 效應，使用陰離子膜或兩性膜有較低的鈮離子滲透率。同樣，Nafion 的成本較高促使人們尋求其他聚合物膜材料。這些材料中的一種是芳族聚醚磺酸材料。另一組材料是可以製備具有高度選擇性的膜分離和化學性質的金屬有機骨架膜，其有在將來 VRB 系統中使用的潛力。

三、參考文獻：

- [1] C.H.L. Tempelman et al., Membranes for all vanadium redox flow batteries, J. Energy Storage 202, 238 (2020).
- [2] Yu Shi et al., Recent development of membrane for vanadium redox flow battery applications: A review, Appl. Energy 101754, Vol. 32, 2019.
- [3] Lorenz Gubler, Membranes and separators for redox flow batteries, Curr. Opin. Electrochem. 31, 18 (2019).
- [4] Qingtao Luo et al., Preparation and characterization of Nafion/SPEEK layered composite membrane and its application in vanadium redox flow

	battery, J. Membr. Sci. 553, 325 (2008). [5] Md. Abdul Aziz et al., Sulfonated graphene oxide-decorated block copolymer as a proton-exchange membrane: Improving the ion selectivity for all-vanadium redox flow batteries, J. Mater. Chem. A 17740, 6 (2018). [6] C. Jia, J. Liu, and C. Yan, A multilayered membrane for vanadium redox flow battery, J. Power Sources 190 – 194, 203 (2012). [7] G. Hwang, H. Ohya, Preparation of cation exchange membrane as a separator for the all-vanadium redox flow battery, J. Memb. Sci. 55 – 67, 120 (1996). [8] S. Chieng, M. Kazacos, and M. Skyllas-Kazacos, Preparation and evaluation of composite membrane for vanadium redox battery applications, J. Power Sources 11 – 19, 39 (1992). [9] M.A. Aziz, and S. Shanmugam, Zirconium oxide nanotube – Nafion composite as high performance membrane for all vanadium redox flow battery, J. Power Sources 36 – 44, 337 (2017). [10] Gabriele G. Gagliardi et al., Composite Polymers Development and Application for Polymer Electrolyte Membrane Technologies—A Review, Molecules 1712, 25(7) (2020). [11] Helen Prifti et al., Membranes for Redox Flow Battery Applications, Membranes 275–306, 2 (2012).
--	--

- 註：1. 請計畫執行單位上傳提供較具策略性的知識物件，不限計畫執行有關內容。
2. 請計畫執行單位每季更新與上傳一次，另有新增政策建議可隨時上傳。
3. 文字精要具體，量化數據盡量輔以圖表說明。