



◎ 王志文

# 探探 頁岩油氣

以頁岩油氣的探採技術本質來說，  
「探」指的是如何找到富有油氣的位置區域或地層深度，  
「採」指的是如何經濟有效地把地層中的頁岩油或頁岩氣生產至地面。

探探頁岩油氣最普遍可行的方法是利用水平鑽井，  
搭配多階段水力液裂技術，產生地下油氣連接至井孔的裂縫通道。

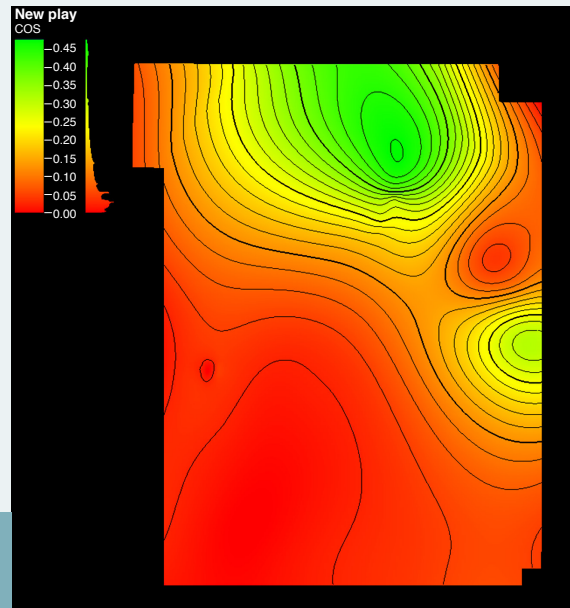
頁岩油氣包含頁岩油和頁岩氣，其差異主要和地層中碳氫化合物的成分有關，是近十多年來相當夯的一個話題。這起因於美國開始大量生產頁岩氣，石化下游業者因而可以取得更便宜的原料，形成了所謂的頁岩革命。

以頁岩油氣的探探技術本質來說，「探」指的是如何找到富含油氣的位置區域或地層深度，即甜蜜點；「採」指的是如何經濟有效地把地層中的頁岩油或頁岩氣生產至地面。目前最普遍可行的方法是利用水平鑽井，搭配多階段水力液裂技術，產生地下油氣連接至井孔的裂縫通道，進而把地底下的石油與天然氣開採出來。

為了開採頁岩層或鄰近頁岩層的緻密砂岩中的油氣，發展出各種先進技術，如微震的應用、會轉彎的鑽頭、即時傳輸地下鑽井資訊或影像至地面，都是為了找到頁岩油氣的甜蜜點，並透過多階段水力液裂打通地層中的任督二脈。而在人工智慧積極發展的當代，石油業界如何利用人工智慧呢？

## 找尋甜蜜點

頁岩油氣礦區能否成為一個具有經濟效益的投資標的，關鍵在於是否能夠找到一個地質上最佳鑽探的甜蜜點，而這個甜蜜點需同時具備「探勘標的品質」與「激勵岩體體積品質」兩個條件。探勘標的品質好壞包括這區域是否含有石油或天然氣，以及其油氣量是否豐富。激勵岩體體積品質包括這區域是否存在良好的天然裂縫，以及施作人工水力裂縫後對油氣生產量是否有幫助。能滿足上述兩個條件才可以稱為地質上的甜蜜點，這樣的井位才可能具有經濟效益。



2015年，美國巴肯某區域的頁岩油評估圖顯示，北方綠色區塊的探勘成功率超過40%，可稱為目標區域的甜蜜點，優先布井鑽探。

探勘標的品質評估包含地球化學的總有機碳、熱成熟窗等評估，了解油氣生成的條件，並根據成熟度判斷可能是頁岩油或頁岩氣，畢竟石油和天然氣價格不同。而岩石物性的天然基質滲透率、孔隙率、滲透率、礦物種類與組成、孔隙壓力屬性等評估，可以了解地下油氣的豐富程度以及可能埋藏在地底下的油氣總量。

當探勘標的品質通過設定的標準後，就進行激勵岩體體積品質評估。除了評估地層中是否存在天然裂縫外，還需要了解岩石的破裂能力或脆性，包含楊氏模數、泊松比等。這些參數是水平井水力液裂的重要參數，也會影響日後的油氣產量。

找尋甜蜜點對石油業界仍是相當大的挑戰。人們在地表上以各種方式窺探



2,000 ~ 3,000 公尺深的地下瑰寶，想知道哪個深度區間可能富含油氣，雖經各領域專家的綜合評估，但鑽探後結果常常不如預期。許多實際案例顯示，在一口已鑽探測試且認為富含油氣的生產井，與其相距不到 300 ~ 400 公尺的平行水平井就不一定可以獲得相同的成果，顯示地層異質性變化度相當大。

## 水平井鑽井

利用水平鑽井開採頁岩油氣時，會先進行垂直段的鑽井，再於適當深度傾斜鑽向目標頁岩層或鄰近頁岩層的緻密砂岩。當水平孔段的鑽井完成後，可在認為有油氣的位置或區間進行穿孔及水力液裂作業。

為什麼生產頁岩油氣需要鑽水平井？除了因為非傳統油氣如緻密氣、頁岩油和頁岩氣在地層的滲透率較低，需要水平鑽井及水力液裂增加油氣通道與流動能力外，對於具有天然裂縫地層、生產層比較薄（2 ~ 3 公尺厚地層）、生產時容易引起水錐或氣錐、加密井、水沖排、二氧化碳沖排、重油或油砂、煤層氣，都可以藉由鑽水平井改善生產問題或增加油氣產量。

鑽至相同地層深度的水平井費用約是垂直井的 2 ~ 2.5 倍，但水平井的穩產率是垂直井的 2 ~ 4 倍。真正決定鑽鑿垂直井或水平井的是兩者的生產能力，水平井的生產能力大約是垂直井的 3 ~ 5 倍，比較 5 年間的累積生產量，水平井大約是垂直井的 1.5 ~ 3 倍。雖然水平鑽井費用比較高，但生產量較大，在合理的油價下仍比垂直井更具有生產競爭力，且較少有生產問題發生。

## 水力液裂

水力液裂是指在穿孔的水平井段注入高壓流體，使地層破裂進而產生人工裂縫。其目的是使人工裂縫與地層的天然裂隙互相交織形成裂隙網路，增加地層間孔隙連通性，藉以增加地層與裂縫流通性，提高石油或天然氣在地層中的流動，進而流到水平井孔後生產至地面。

水平井在進行水力液裂時，會受到所使用的支撐劑影響。傳統液裂流體的支撐劑顆粒較大，並利用樹脂塗層增加油氣的流動，但支撐劑受到重力影響會較快下沉，使得上方裂縫再度閉合。新型態的液裂



傳統支撐劑（左圖）與新型態支撐劑技術（右圖）所形成的油氣通道比較圖。（圖片來源：Schlumberger 石油服務公司）



水平井多階段液裂的施作步驟（圖片來源：Schlumberger 石油服務公司）

支撐劑技術從 2010 年開始發展，使用特定的調和與控制系統，把纖維及較小粒徑的支撐劑瞬時脈衝地打入地層，由於纖維可以減緩支撐劑下沉的速度，不僅不會造成上方裂縫閉合，且會產生高流動性的通道。

根據油氣服務公司在鷹灘的實際應用，使用新技術的結果，平均增加 20% 以上的生產量，減少 40% 的支撐劑用量及 25% 的用水量。這項技術已在 15 個國家、超過 80 個石油公司、1 萬次以上的液裂段使用，總共節省 3 億 5 千萬加侖的水、減少 12 億噸的支撐劑用量及 1,200 萬噸的 CO<sub>2</sub> 排放。

水平井多階段液裂施作的第一項工作是封塞及穿孔，可依據裸孔或下套管的差異選擇不同的設備，把不同型式的封塞器泵送至預定深度或位置，再利用射孔槍穿孔。這時以高壓如 10,000 psi 在華氏 350 度

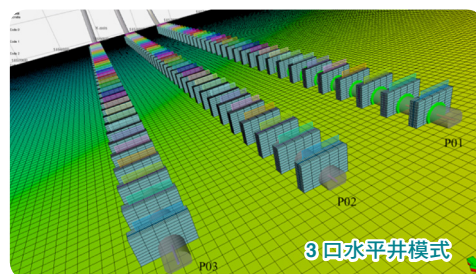
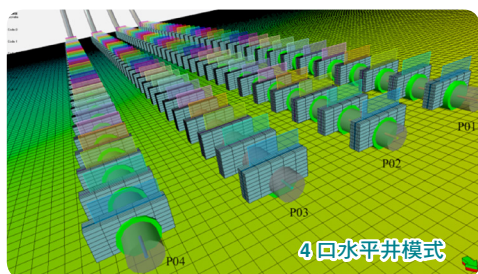
下泵送液裂流體進入井孔中而產生壓裂，然後回收泵送的液裂流體。接下來，封塞器和穿孔器再往下一個深度或位置移動，重複完成上面的步驟。

## 非傳統頁岩油氣評估

油氣服務公司以特別的模組與軟體評估非傳統頁岩油氣，這模組能整合井測解釋分析軟體所估算的總有機碳及地層應力與應變資料進行地質建模。在評估頁岩油氣在空間上的甜蜜點後，再結合鑽井設計與水力液裂功能，進行生產井布井與水力裂縫分布，並把所建立的模式與油層模擬軟體進行生產動態模擬，用以評估該區域生產井的生產潛能。

雖然頁岩模組具有強大功能，但實際上要完成這些工作項目必須有震測資料、





利用模擬軟體建立水平井多階段液裂模型，把地層與裂縫中的參數輸入，分別建立4口井和3口井兩種模式，所完成的模式可用於油氣層數值模擬，評估其油氣生產量的多寡。

井測資料（含S波電測）、工程資料，甚至是微震資料等。大多數石油公司會缺乏部分資料，實際上很難完整建模，僅少數有獨立研發部門的大型國際石油公司才有機會做到，並需要相當多的經費。在美國實際從事頁岩油氣開採的小型石油公司，為了節省研究經費，通常會先鑽一口井賭賭看，再根據鑽井結果決定是否鑽下一口井。目前，一口2,000～3,000公尺深的水平鑽井和多階段水力液裂的費用約500～1,000萬美元。

## 人工智慧的應用

油氣產業是高科技產業，對於人工智慧在油氣田開發的應用研究，自然也不會落後於其他產業。特別是在美國墨西哥灣漏油事故後，石油公司已評估把人工智慧應用於海上鑽井作業，以減少鑽井平台上的人力需求並提高工作效率。

除了海上鑽井外，人工智慧的快速發展對油氣產業的影響已經顯現，從單一石油井的數據蒐集到數位化油田等技術不斷更新。透過有系統地蒐集各油田中各井的壓力、溫度、流率等數據，可用來分析、評估協助油氣田生產、營運與管理。

國際油氣服務公司已研發出新型的智慧鑽桿，內裝高速數據傳輸電纜，可使井下鑽頭透過電纜向地面上或平台上的作業工人即時傳遞井下資訊。所研發的鑽頭可操控鑽速和方向，水平鑽井或定向井就是依賴這個技術。未來，機器人鑽井系統成為智慧鑽機的核心科技後，智慧鑽機具備連續起下鑽、送鑽、循環、連續下套管等功能指日可待。

智慧鑽井技術的發展使未來鑽井可能不再需要工人或僅用少量人力，也就是自動鑽井裝置可利用衛星定位自動進入井場，自行組裝井架後開鑽，鑽井完畢後再自行移至下一個井場。自動鑽井技術或許是

人工智慧的快速發展對油氣產業的影響已經顯現，  
從單一石油井的數據蒐集到數位化油田等技術不斷更新。

石油產業中的鑽井、單井生產、油氣田開發生產、油氣管線運輸，甚至煉油廠都會陸續進入智慧化時代。

個夢，但可能成為未來油氣產業發展的重要趨勢。

隨著資訊科技的進步，油氣田的開發生產已進入數位化階段。油氣從井口生產出來時，需要記錄其流出井口時的壓力、溫度等資料，甚至記錄井底下生產層位的溫度與壓力。這些資料透過雲端彙整至石油公司的資料庫，讓在世界各地工作的員工都可以即時分析與掌握各油田的第一手資訊，不僅可減少人員操作、管理過程中可能發生的錯誤，也可減少石油作業人員在惡劣環境下如沙漠或海上油田的人力需求。透過數位化油田管理與雲端資料庫，可以提高油井的生產量與採收率，還可以有效降低運營成本。

在新技術的發展下，世界油氣工業的自動化、資訊化、智慧化程度會越來越高。在 2020 ~ 2030 年，可預期石油產業中的鑽井、單井生產、油氣田開發生產、油氣管線運輸，甚至煉油廠都會陸續進入智慧化時代。當人工智慧的發展成為石油工人的頭號敵人時，這時候的石油工人又會有何想法呢？

數位化油田技術在沙漠中的應用



該井正在進行數位化油田實驗，透過數位化壓力與溫度表記錄數據，嘗試減少每天 3 次巡井抄表的人力工作量。

王志文

台灣中油公司探採研究所

