



◎ 翁榮南

頁岩油氣的 崛起

在美國對能源迫切需求的時代，
以及油人堅持探油技術的創新應用下，
頁岩油氣產業迅速崛起。



頁岩油氣是蘊藏在頁岩中的石油及天然氣，它是散布存在的，沒有經過自然作用的聚集，資源密度遠比油氣藏低。

石油（含天然氣）已取代煤成為 20 世紀工業社會的基本要素，因此人類對石油的需求在一百多年內遽增，現今每天消耗的石油近 1 億桶。為了提供如此大量的油氣，產業界於是積極探勘，而能源危機也一直如影隨形。

所幸近十多年來頁岩油氣崛起，在探勘觀念改變、技術提升、可採資源量及產量大增下，一時之間能源危機似已成過往。相對而來的是油氣可能供過於求，而影響油氣市場甚至全球的政經發展。

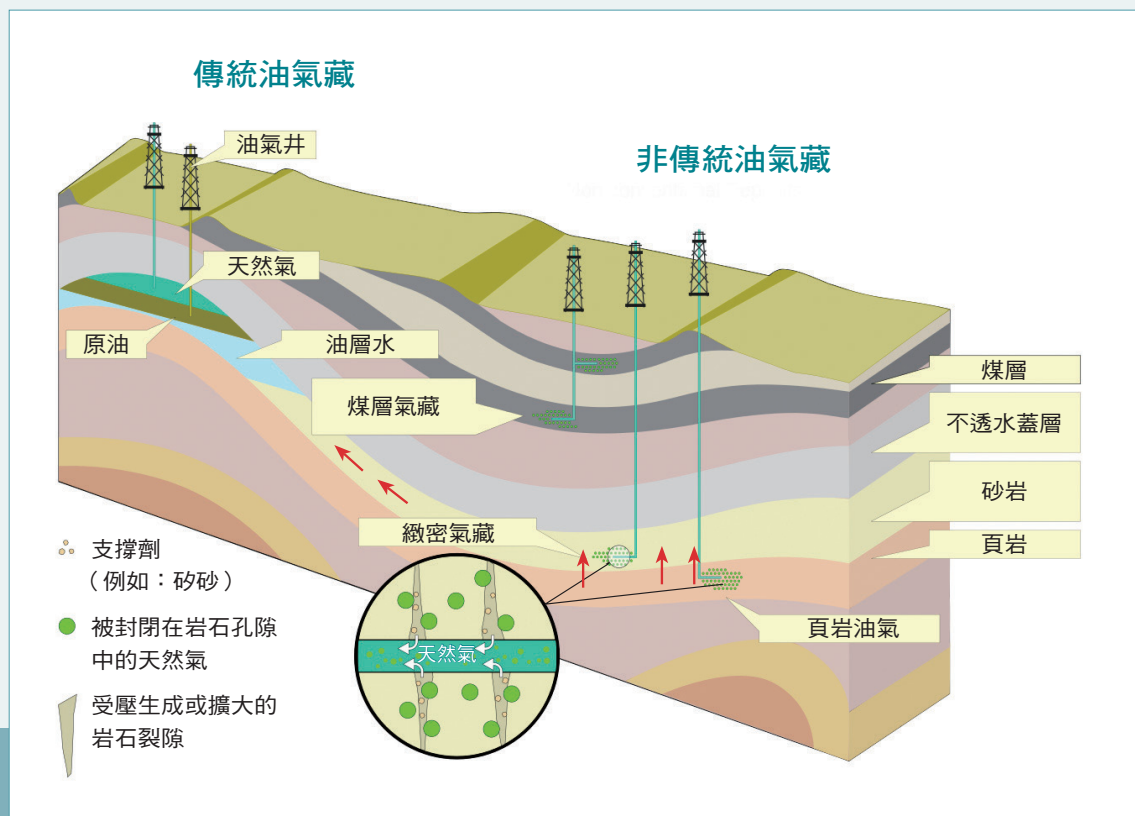
頁岩油氣資源

頁岩油氣是指蘊藏在頁岩中的石油及天然氣。石油是過去地質年代中的沉積有

機質經埋藏演變所生成，一般生物死亡後，大部分的生物體分解氧化回歸到大氣中。但在特殊環境如快速沉積造成的缺氧還原環境，少部分的生物有機質包括陸生植物體、水生浮游生物、藻類等，可能埋藏到地層中成為沉積有機質。

頁岩是由細顆粒的沉積物沉積而成，沉積顆粒小因而表面積大，在沉積過程中容易吸附有機質，因此地層中的有機質多富集於頁岩。隨著地層的埋深增加、溫度升高，頁岩中的沉積有機質受熱裂解產生碳氫化合物，就是石油（碳數較高的碳氫化合物）和天然氣（碳數較低的碳氫化合物），頁岩也因此稱為生油岩。

頁岩生成的油氣一部分保留在頁岩中，就是頁岩油氣。另外一部分的油氣排放離開



油氣由頁岩中的有機質生成，油氣排出移聚形成傳統油氣藏，保留在頁岩中的頁岩油氣屬於非傳統油氣。(圖片來源：修改自 Shale gas-Wikipedia)



緻密的頁岩，進入鄰近沉積顆粒較粗、孔隙率較大、滲透率較高的地層，如砂岩層。由於油氣比重小於地層水，油氣在砂岩層中逐漸上浮移棲，其中大部分散布在地層中，或逸散到地表進入大氣或水域。一部分油氣在移棲過程中可能被封閉聚集在有緻密蓋層的圈閉內，充填在圈閉蓋層下地層（常是砂岩，稱為儲集層）的孔隙空間，而形成油氣藏。

一個地區地層中頁岩裡所含的油氣總量遠大於從頁岩排出移聚到圈閉油氣藏中的油氣量，但頁岩油氣是散布存在的，沒有經過自然作用的聚集，資源密度遠比油氣藏低。

油氣探勘

自 19 世紀末石油探勘產業發展以來，傳統的石油探勘就是根據對地層中油氣生成、移棲、聚集成藏的認知，建立探勘的基本原則，測勘找尋圈閉的油氣藏。但在茫茫的地層深部釐定面積有限的油氣藏位置，就像大海撈針，即便發展出各種地質、地球物理、地球化學測勘技術，地質風險仍然很高，通常探勘油氣藏圈閉的地質成功率只有 20%。

反觀頁岩油氣，早在 1821 年紐約州就有從淺層低壓的破裂頁岩層中取用頁岩氣的紀錄。雖然大家都知道頁岩分布廣泛，頁岩中有油氣存在，探勘成功率高，但開採困難。如何從孔隙率及滲透率差的緻密岩層開採出油氣，能否有經濟價值，都有待技術克服，因此石油探勘界一直沒有把

頁岩視為探採目標。直到 21 世紀初，開採技術成功，頁岩氣才快速嶄露頭角，成為重要的天然氣資源。

美國頁岩氣源起

美國一度是全球最大產油國，1860 年代年產量 50 萬桶，占當時全球產量的 98%。但隨著其他地區如中東的石油探採大增，到 1950 年代，美國日產石油約 590 萬桶，占全球的比重下滑到 57%，加上國內對石油的需求急速增加，漸漸變為石油進口國。

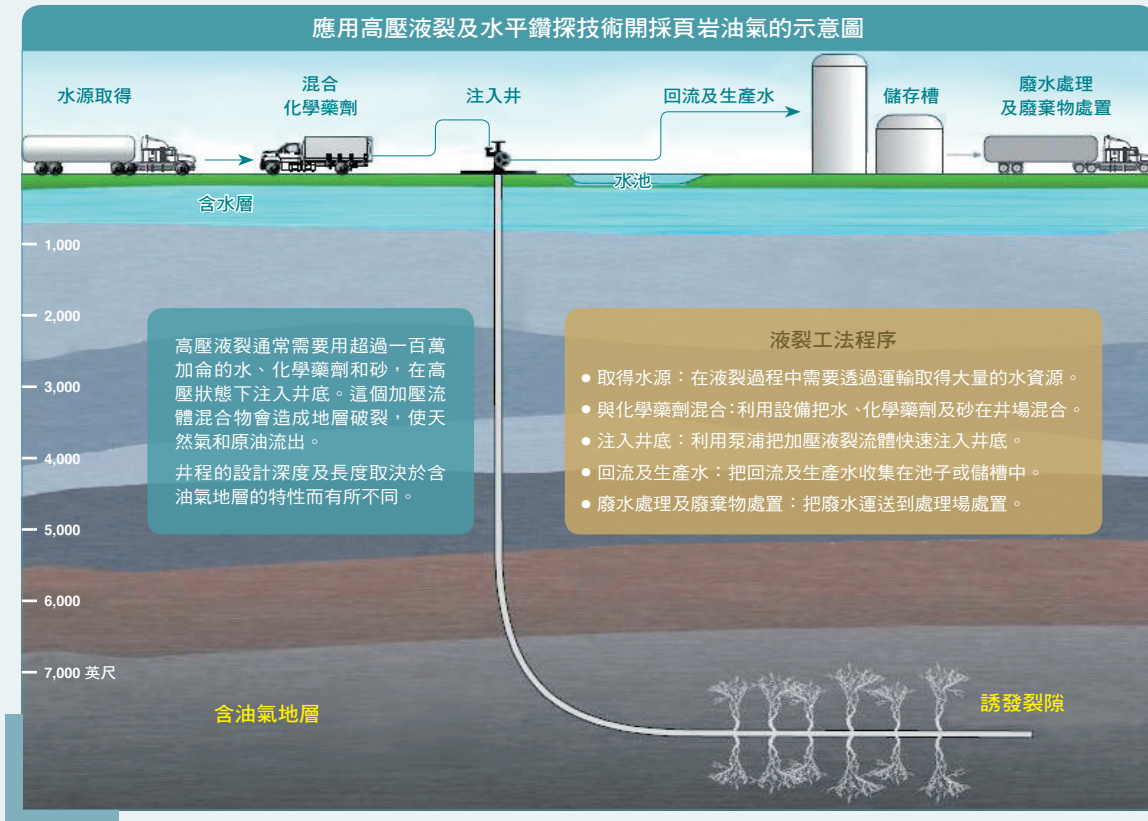
1973 年中東戰爭爆發，石油輸出國組織宣布石油禁運，國際油價暴漲，造成石油危機。石油是牽涉國家安全的物資，過度倚賴進口畢竟是國家隱憂。美國政府為確保能源安全，一方面藉由政治外交手段拉攏控制與產油國的關係來鞏固油源，另一方面提出有利石油業的政策，從稅率及法規面鼓勵國內的石油探採，同時加強油氣探採技術的研發應用。頁岩氣的崛起就是在這種有利的環境下出現的。

關鍵技術

頁岩油氣的開採有兩個關鍵技術—水平鑽探與水力壓裂（液裂），可擴大井孔與目標地層的接觸面，並打碎鑽遇的地層，把低孔隙率、低滲透率的頁岩（或緻密砂岩）中不易開採的油氣釋出。

這兩個技術並非新創，美國早在 1930 年就有水平鑽井技術，可以從地表鑽至地下特定目標，另外為了增產及提升生產流量，

21 世紀初，由於開採技術成功，頁岩氣快速嶄露頭角，成為重要的天然氣資源。



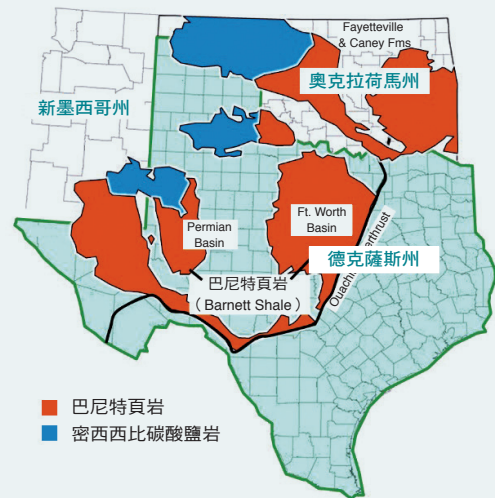
1947 年就有壓裂技術。只是這兩個技術一直沒有被產業界廣泛應用，直到 80 年代美國為提升國內石油產能，加強探採技術研發，才使這兩個技術再度發展，並實際應用於頁岩油氣生產。

關鍵人物

美國德州沃斯堡地下數千英尺，有一片分布數千平方英里的巨厚頁岩—巴尼特頁岩。長久以來，石油公司在這片頁岩的上下地層進行傳統的油氣探勘，開採出大量油氣，但已逐漸枯竭。

1980 年代初，米切爾能源及開發公司的創辦者德州油人喬治·米切爾（George P. Mitchell）讀到一篇科學文章，討論頁岩氣是否具有經濟開採效益。他為了公司的生存決定排除眾議，鑽進巴尼特頁岩，

頁岩革命發源地—巴尼特頁岩地理位置及分布



巴尼特頁岩是密西西比紀地層，地質年代 3.54 ~ 3.23 億年，富含有機質，也蘊藏大量生成的天然氣，但岩層緻密不易開採，應用液裂技術首度在這地層成功生產頁岩氣。

應用高壓液裂技術誘發頁岩裂縫，開採釋出的天然氣。從 1980 到 1990 年代連續 15 年，米切爾不斷嘗試頁岩液裂技術。1997 年，藉由高壓注入水、砂和化學混合液終於成功液裂頁岩產出頁岩氣，再佐以新的水平鑽井技術擴大生產區域，更提高了頁岩氣的產量達到商業生產。

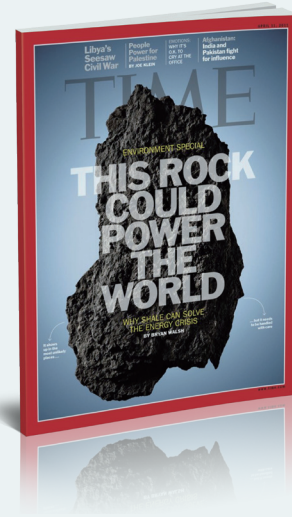
油氣探採自此進入一個新領域，展開所謂的頁岩革命，改造美國油氣產業，也影響了全球。

頁岩油氣崛起的影響

成功的起頭案例帶動了大量的追隨者，美國頁岩氣的開採從此如火如荼展開。2001 年，美國頁岩氣產量占全國天然氣產量的 1%，2006 年急速增加到 20%。這場革命在美國可謂是又快速又普遍，而全球油氣探勘界也一窩蜂地跨入頁岩探採領域，對全球石油業、經濟、政治造成了巨大的衝擊和影響。

有別於過去油氣鑽採的目標以圈閉的砂岩儲集層為主（現今稱為傳統油氣），頁岩油氣、油砂、重油、煤層氣、天然氣水合物等其他油氣資源則統稱為非傳統油氣，其中頁岩油氣是目前最具經濟潛能的。

頁岩革命造成油氣探勘觀念開放，一時之間大眾對各種非傳統油氣另眼相看，認為只要創新技術、突破瓶頸，原來不具經濟價值的資源也有機會大放異彩，轉變成經濟資源。但諷刺的是，頁岩油氣的成功，供給增加，油氣價下跌或難以上漲，反而壓抑了其他非傳統油氣資源的發展，尤其是油砂及油頁岩，或延後天然氣水合物的發展，畢竟產業界還是以價取勝，先開發具經濟效益的資源。



黑色頁岩成為 2011 年 4 月 11 日出版的《時代》雜誌的封面主角，標題是「這塊石頭可以帶動全世界」。

成功可以複製嗎

美國頁岩氣的成功受到全球矚目，各國政府及石油公司莫不積極投入頁岩油氣探採，希望能儘速複製美國的成功經驗。但基於各種主客觀因素，至今除了加拿大及大陸部分地區有具規模的頁岩油氣探採外，其他地區仍未見成效。而美國的成功是由於下列多個有利條件所致。

在地質條件方面，美國境內頁岩分布廣、面積大、厚度夠、埋藏淺，技術可採收率高、資源量大。其他地區如歐洲，頁岩面積小、埋藏深，頁岩中的黏土含量高，不易壓裂，技術可採收率低。大陸則是地質條件複雜，頁岩埋藏深，不易開採，也欠缺水資源進行水力壓裂。

美國政府對石油業者有一套嚴謹的探採資料保存規定，因此累積了大量的岩心及地質資料，有利於了解頁岩的特性，

頁岩油氣產業在美國崛起至今僅短短十多年，
歷經劇烈油氣價格變動沒有被擊退，
反而造成全球油氣供需結構的改變。

釐定適合頁岩油氣開採的地點。而其他國家油氣探採歷史短，且沒有樣品及地質資料保存的制度，一時很難掌控頁岩的分布及特性變化。畢竟頁岩雖然比砂岩分布廣，但並非均質的，頁岩特性如岩性組成、油氣成分含量、是否容易壓裂等，都因沉積環境或埋深而異，隨分布而不同。

在法規方面，美國政府 1980 年代就開始積極推出有利的石油政策，提供優惠的稅法，其油氣產業因此蓬勃發展。除了大型石油公司外，還有更多的中小型油公司，形成了完整的探採服務產業。2005 年的能源法更把液裂作業排除在清潔水法之外，免除了石油業者進行液裂的繁瑣程序。

美國探採歷史長，民眾多已接受探勘活動，歐洲民族較為保守，對環保要求嚴格，例如波蘭、英國對頁岩油氣開發的爭議相當大。另外，美國的地主擁有地下礦產的所有權，有利可圖就會樂於參與，而且探勘鑽井生產與天然氣輸氣管線發達，交易市場成熟健全，都有利於頁岩氣的發展。

進行中的頁岩革命

自從 2003 年開始以水平液裂方式採收巴尼特頁岩氣之後 5 年間，美國投入頁岩氣的中小型公司如雨後春筍，使得天然氣產量大增。在供需失調的狀況下，2008 年夏季氣價崩跌，頁岩氣產業面臨了第 1 次的危機。2010 年之後，許多公司開始避開頁岩氣，把技術及鑽井設備轉移到生產價值較高的輕質頁岩油，造成美國原油日產量從 2008 年的 5 百萬桶增加到 2014 年的 9 百萬桶。但 2014 年後半年需求急遽減緩，

市場供需失衡，頁岩生產商遭到嚴重打擊。

頁岩油氣的開採有賴水平鑽井及液裂技術，由於頁岩的緻密性，單井的生產率快速下降，產量有限，必須不斷大量鑽井維持產量，開發成本相對於傳統油氣，尤其是中東許多的油田，昂貴許多。然而，由於油價下滑，開發商也被迫精進技術，優化生產作業模式。頁岩開發的成本因不同的地區及不同的井而有所不同，但都明顯呈現學習曲線劇烈下滑。

自頁岩革命開始至今，頁岩氣從最初產量近乎零，到現在日產氣約 500 億立方英尺，頁岩革命不只是頁岩氣，也擴及到原油。沙烏地阿拉伯的低油價策略沒能把頁岩油氣趕出市場，反而驅使了第 2 次頁岩革命，美國頁岩產業乘機強化技術，大幅降低成本。更重要的是，有更多的蘊藏被發現，尤其是原油。因此美國終將減少油氣進口，甚至轉為出口，進而嚴重影響全球的石油市場。

頁岩油氣產業在美國崛起至今僅短短十多年，歷經劇烈油氣價格變動沒有被擊退，反而造成全球油氣供需結構的改變。隨著頁岩油氣的探採技術繼續發展及開採領域的擴張，可以預期的是頁岩油氣產量現在仍處於成長階段，未來油氣供應能力會繼續成長，但也面臨全球政治角力、經濟消長、環境變遷、能源轉型等問題的挑戰。

翁榮南

台灣中油公司探採研究所