

可以燃燒的石頭——油頁岩

■ 黃富文、吳素慧

21 世紀末，我們勢必會被「石油與天然氣耗盡」這記重拳痛擊！目前，美國正在進行油頁岩開發的新能源革命，點石成金術將帶領人類開啓化石燃料的新扉頁。

油頁岩

自然界有可以點燃的石頭——油頁岩，這是真的！人類自史前時代就用油頁岩當燃料，鐵器時代的英國人甚至把油頁岩做為飾品。近代工業開採油頁岩最早可追溯至 1837 年法國的 Aulun，接著在蘇格蘭、德國及其他國家都有開採的紀錄。

油頁岩一般呈褐黑色或黃褐色，質地很細膩，具油脂光澤，有時就像一疊紙片一樣，用手扳折會略呈彎曲，敲打時則發出像敲木頭的聲音。油頁岩是一種含有機質的沉積岩，在湖泊和海洋中都可以生成，且存在於各地質年代的地層，關鍵在於大量的有機質來源和良好的保存條件，因此可簡單地分類為陸相、湖相、海相等油頁岩。

油頁岩內絕大部分有機質是不溶於普通有機溶劑的成油物質，俗稱「油母質」（kerogen）。油母質大都來自植物的孢子、花粉及藻類，在顯微鏡下可以清楚地看到它們的化石形態。除了藻類及其他植物殘體外，有的油頁岩中還常有豐富的魚類化石。



可以燃燒的石頭——油頁岩（圖片來源：http://en.wikipedia.org/wiki/Oil_shale）

頁岩因其滲透率很低的特性，使得油頁岩油的開採非常困難，因此其開採技術與一般石油不同，必須先把油頁岩採集至地表，再經乾餾後才可分離出油頁岩油。

油頁岩可以是由腐泥、腐植或兩者混合而成的。它和煤的區分是灰分含量超過 40%，灰分含量是指物質經過攝氏 550 度至 600 度燃燒後殘留物質的百分比，與碳質頁岩的主要區別是含油率大於 3.5%，相對密度是 1.4 ~ 2.7，屬於低熱值固態化石燃料。一般都以每公噸油頁岩能產出 0.25 桶（即 0.034 公噸）以上油頁岩油稱為「油頁岩礦」，或把產油率高於 4% 的油頁岩稱為「礦」。

油頁岩的主要成分是有機質、礦物質和水分。其中有機質含量約為 10 ~ 50%，由複雜的高分子有機化合物組成，富含脂肪烴，芳香烴則較少。另氫碳原子比是 1.25 ~ 1.75，也高於煤炭。一般而言，若油母質含量高且氫碳原子比率大，表示產油率高，顯然油頁岩頗值得期待。

除油母質外，組成油頁岩的礦物包括石英、黏土、長石、碳酸鹽、硫鐵礦等，其中尤以黏土為主，含量較少量的礦物則有鈾、鐵、鈾、鎳、鉬等金屬。這些礦物在油頁岩隔絕空氣下加熱會分解成為灰分，可用以生產建築材料、水泥和化肥，其中的金屬礦物還可用於提煉金屬。

油頁岩在隔絕空氣下加熱，是希望能把其中的油母質分解成油頁岩油、半焦及乾餾氣。其中油頁岩油類似原油，可做為燃料油或進一步加工製成汽油、柴油和下游石化產品。

頁岩因其滲透率很低的特性，使得油

頁岩油的開採非常困難，因此其開採技術與一般石油不同，必須先把油頁岩採集至地表，再經乾餾後才可分離出油頁岩油。

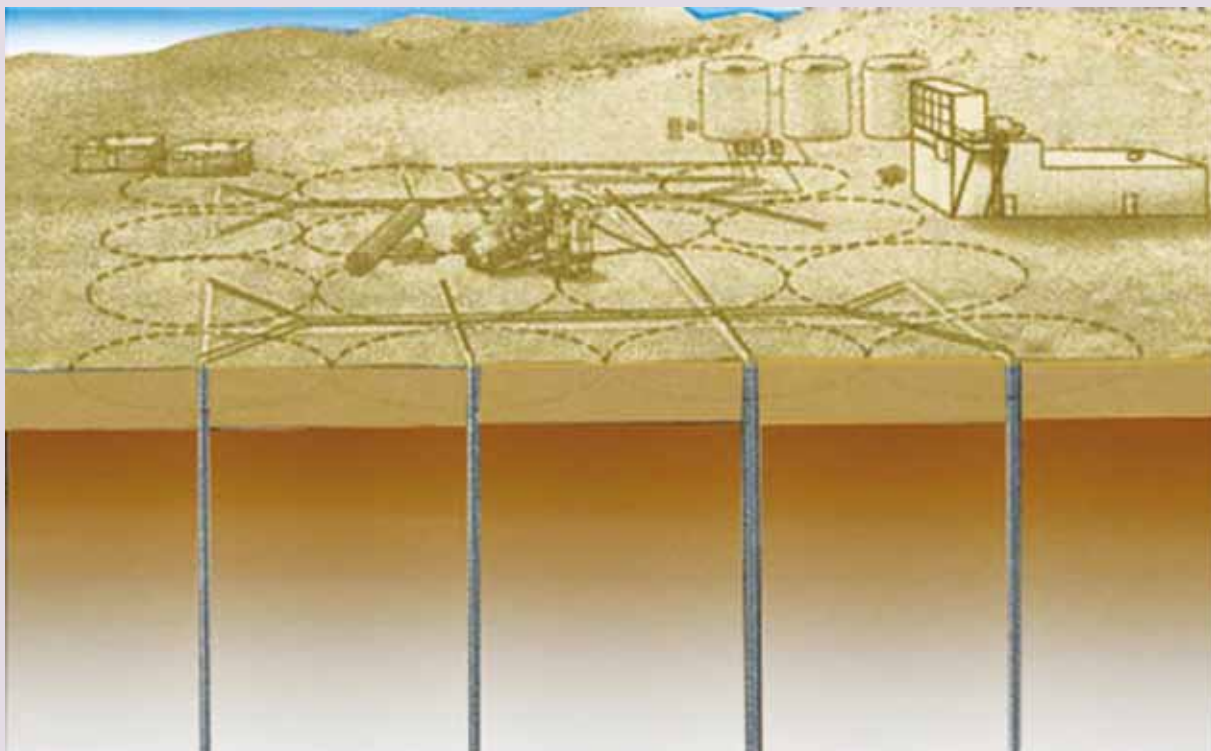
在地質歷史中，各個時期都有油頁岩生成，資源量十分豐富，現已知有六百多處油頁岩沉積地，估計全世界油頁岩油的可能儲量是 2.8 ~ 3.3 兆桶（約 $450 \times 10^9 \sim 520 \times 10^9$ 立方公尺）。但因現地的資料較少，甚至有些估算所使用的資料也是假設值，因此這些估算量的不確定性很大。

世界上主要的油頁岩儲藏處包括美國科羅拉多州、猶他州等的 Green River 沉積地，澳洲 Tertiary 沉積地、瑞典和愛沙尼亞沉積地、約旦 El-Lajjun 沉積地，以及法國、德國、巴西、中國和俄羅斯的沉積地，估計每公噸油頁岩至少可生產 40 公升的油頁岩油。

生產歷史

從 19 世紀初人類就已知道利用油頁岩做為燃料，並製成煤油、燈油、石蠟等照明產品，並對工業革命提供了相當大的幫助。在一次大戰前，由於傳統石油產量的不足，和大量車用油的需求，使得歐洲的油頁岩工業迅速擴張。二次大戰後，雖然愛沙尼亞和中國的油頁岩工業持續成長，其他國家則因考量到油頁岩處理費用及原油生產成本過高而無經濟價值，因而放棄了這一工業。

雖然 1973 年的石油危機促使世界油頁岩油的產量在 1980 年達到 46 百萬公噸的



GSI 公司研發的利用注入過熱空氣現場汽化油頁岩中的烴類物質，然後帶到地面冷凝產生輕質烴類液體和氣體的設置圖。（圖片來源：修改自錢伯章，2010）

高峰，但由於便宜傳統原油的競爭，造成 2000 年油頁岩油的生產又萎縮至每年只有 16 百萬公噸。甚至在 1982 年 5 月，艾克森公司因為油價低和油頁岩油處理費太高，竟然一次就辭退了 2,000 個頁岩的員工，造成巨大的社會衝擊。1986 年美國雷根總統簽署法案，宣布美國放棄合成液態燃料的計畫，油頁岩的計畫便告中止。

2003 年油頁岩工業在美國一個油頁岩和原油的開發計畫中重新開始，2005 年美國有關當局另引進一個新計畫，出租公有土地以供抽取油頁岩和油砂中的原油。自此，油頁岩工業又鳳凰再生再度受到人們的注意。

開採技術的發展

近兩世紀以來，油頁岩的開採大都用地面乾餾的方式處理，直到最近才發展出先進的地下轉化程序。其實這兩種處理方式都

是利用熱解（在 450 至 500 度的缺氧環境下分解），把油頁岩內的油母質轉化成油頁岩油（合成原油）、油頁岩氣、凝結油及礦尾。雖然油母質在低溫（300 度）就可分解，但為提高分解速率及其完整性，還是需要如此的高溫。

以地面乾餾方式製取油頁岩油，是利用露天或井下方式把油頁岩採集到地面再行乾餾。這種方式限制比較大，包括地下油頁岩的採收率低；生態及水質破壞嚴重，因為無論是露天或是井下開採，都需把地下水抽到油頁岩層層位以下，但開採 1 立方公尺的油頁岩會抽出 25 立方公尺的地下水，這些地下水同時污染了地表水源；礦尾灰渣污染嚴重，特別是金屬元素和微量元素對空氣及水源的污染；直接開採占地較多，且開墾後地表無法完全復原。

地下轉化方式則是以鑽井的方式把地面的熱量引入地下，加熱地下的油頁岩，使

開採及抽煉油頁岩以往都在地表進行，但由於效率和環保的問題，陸續發展出許多地下處理的方法。

其中的有機質裂解成液態和氣態有機物，再把它們回收到地面分離處理。這種技術的優點是提高了資源開發利用效率，並減少了開採過程中對生態環境的破壞。

地下轉化程序開採技術是殼牌公司（Royal Dutch Shell）投入巨資研發的開採油頁岩及其他非常規油氣的專利技術，它的原理是在地下加熱和裂解油頁岩層，儘管技術還未完全商業化，但關鍵的技術、設備等問題都已解決，並已在美國科羅拉多州和加拿大阿伯他省進行商業試驗。按 2005 年 5 月每桶原油的開發成本估算，傳統油頁岩乾餾需要 20 美元 / 桶，地下轉化程序技術生產只需 12 美元 / 桶，因此這技術在油價高於 25 美元 / 桶時理論上是可獲利的。

另一種地下加熱方式，是由通用合成燃料國際公司（General Synfuel International, GSI）發展的「油頁岩現場氣化技術」，這技術於 2009 年 5 月在 Green River 油頁岩層現場進行試驗。這一技術的主要步驟是先向油頁岩層鑽井後，在井孔內放置入口導管，在地表放置出口導管，地下流體（含油頁岩油）可經由導管流出至地表。

做法是以地面上的燃燒器使空氣過熱，接著把過熱空氣加壓打入油頁岩層內。過熱空氣的熱量在通過導管時，藉由輻射及傳導加熱附近的油頁岩。高溫和壓力使油母質氣化，油頁岩的多孔性可讓氣態烴類進入出口導管，再導入冷凝器膨脹和冷卻以產生液體和氣體烴類。過程中所產生的部分氣體被送到燃燒器與其他循環原料混合，成為可燃材料提供燃燒器持續燃燒。這技術已應用至 Anadarko 公司的懷俄明及科羅拉多礦區，預計兩年內可完成礦區開發。

除地下加熱方式外，地面乾餾方式也有所改善。德國的 Outotec 公司於 2009 年 8 月為愛沙尼亞 Eesti 公司設計了 Enefit-280 程序加工處理油頁岩。在乾餾處理時，先把油頁岩磨碎成小於 20 毫米的大小在管中乾燥，然後與另一爐中燃燒廢油頁岩產生的熟灰（800 度）混合。混合物再於 520 度下熱解，熱解氣體通過旋風分離器時從油頁岩中分離出來，熟灰分和半焦炭則運送到另一爐中產生熟灰用於熱解。

Enefit 程序使處理能力加倍且有更高的熱效率，使抽出油的油頁岩能完全燃燒。大多數的熱能可回收產生蒸氣並用於發電，處理後的灰分及有機碳可用於填埋，過程中的排氣符合無汙染的法規。這程序的目標是處理大規模露天開採的油頁岩，在油價高於 65 美元 / 桶時就有經濟價值。

開採的挑戰

根據 2010 年國際能源組織的估計，全球油頁岩資源量大於 5 兆桶，其中可採收量就大於 1 兆桶，相較於 2007 年世界可採收的傳統原油只有 1.317 兆桶，顯然毫不遜色。而許多油頁岩的資源還未計入，例如中國西北區域地層，因此在傳統油氣資源越來越稀少的情況下，油頁岩的開採價值越來越受到重視。

開採及抽煉油頁岩以往都在地表進行，但由於效率和環保的問題，陸續發展出許多地下處理的方法。地下處理的方法包括純地下處理及改良地下處理，後者是挖取地下的一部分油頁岩至地面以製造新的流動通道，便於油氣流出。

油頁岩油含有較高的石蠟、氧化物和氮化物，有些甚至含有更多的硫和砷。以西德州原油而言，最高含硫是 0.42%，Green River 油頁岩則是 0.76%，約旦的油頁岩提煉出的油頁岩油含硫甚至高達 9.5%。另外，Green River 油頁岩提煉出的油頁岩油也含有砷，因此從油頁岩中抽取出來的油頁岩油顯然無法完全取代傳統的原油。

由於油頁岩與下層的岩層油母質含量呈漸變關係，因此沒有固定的層面，經濟可採收量很難估計，而且開採油頁岩只有當提煉出的成品比傳統原油便宜時才有經濟上的利益。以目前美國在地表生產一桶油頁岩油約需 70 ~ 95 美元來看，當生產量到達 5 億桶時，估計花費可省下 35 ~ 70%。假設每天生產 25 千桶，則在 12 年內每桶約降為 35 ~ 48 美元。當產量達到 10 億桶時，生產花費甚至可降至 30 ~ 40 美元 / 桶。

2005 年，殼牌公司宣稱在傳統原油每桶價值 30 美元以上，其油頁岩油地下處理技術就有競爭性，但部分學者認為這宣稱似乎有過於誇大之嫌。另一項競爭來自煤的液化成油技術，1972 年法國研究報導 1 公噸煤可轉化生產 650 公升原油，而 1 公噸油頁岩只可生產 150 公升油。

就環保方面來說，考慮的重點是能量投益比 (energy returned on energy invested, ERORI)，即產生多少能量與用掉多少能量來開採的比率。1984 年研究顯示，油頁岩的 ERORI 在 0.7 至 13.3 之間，地面處理的 ERORI 是 4 到 5，而地下處理技術的 ERORI 低至 2，但可用油頁岩或其產生的天然氣來燃燒以提高 ERORI。另外，用水及廢水的處理也是需要考慮的問題。

基本上，油頁岩地下處理技術會隨著美國近來在頁岩油—頁岩氣 (shale oil-shale gas) 開採技術的提升而升高，而因油價逐漸攀升、技術的發展，以及各國的原油政治考量，未來油頁岩的大規模開採是可以期待的。

黃富文、吳素慧
台灣中油公司探採研究所

深度閱讀資料

錢伯章 (2010)，*新能源技術叢書：石油和天然氣技術與應用*，科學出版社，北京。

Clark, C. F., R. G. Murray and O. Svensson (1978) *Oil Shale*. ETEP 9, Energy Technology Economics Program, SRI International, CA.

http://en.wikipedia.org/wiki/oil_shale