

低污損鑽井技術研究

王文烈、吳柏裕、黃乙倫

台灣中油公司探採研究所

摘要

鑽井作業時，常因鑽井泥漿、濾液或鑽鑿固粒等侵入生產層，造成地層污損，改變了生產層的特性，導致生產率降低。特別是低壓地層的鑽井作業，因為差壓的增高，更需特別留意地層污損的預防。因此地層污損預防方法、負壓鑽井技術、控壓鑽井技術與低污損鑽井泥漿等相關技術研究係極為重要的工作。

負壓鑽井技術中以泡沫鑽井技術及充氣泥漿鑽井技術較普遍及實用，因為泡沫鑽井比空氣鑽井所需能量較小，不需較高的環孔流速，較不會產生沖蝕的問題；充氣泥漿鑽井技術具有比重可自由調整、無漏泥不循環現象與避免差壓黏卡等卡鑽意外事件之優點。

控壓鑽井所需之鑽井工作窗 (Drilling Window) 較超壓鑽井小，亦即較不會發生漏泥或噴井等事故。在挪威北海大陸棚 “Mandarin East” 井應用控壓鑽井技術，共節省 7,500,000 美元 (S.K. Naesheim et al., 2011)；中國衡 6 井採用控壓鑽井技術，成功地避免了漏泥和差壓黏卡等鑽井問題，提高了鑽井的經濟效益與安全性。相較於傳統的超壓鑽井技術 (Overbalanced drilling)，控壓鑽井技術在鑽井時能夠分辨生產力較佳的生產層，且能降低鑽井流體對儲集層產生的汙染與危害，進而提高生產率。微滲流控制之控壓鑽井技術透過標準模式與特殊模式之切換，使得泥漿比重可以控制在一個較精確的安全範圍內，進而提高了鑽井成功率。

在低污損泥漿評估方面，鑽入泥漿系統確實具有較佳的抗地層污損效果，但相較於 PHPA 系統，其卻具有較高的黏度與較低的水泥污容忍度，因此建議未來下水泥前應先置換回 PHPA 泥漿，以防止泥漿材料之耗費。

建立地層污損預防方法，研究負壓鑽井、控壓鑽井及低污損泥漿配方等相關技術，有效降低鑽井作業造成之地層污損及增加油氣採收率。藉由降低對鑽井工程沒有幫助的無效益時間 (Non-productive Time, NPT) 以增加鑽井操作效率，可提高鑽進率、減少漏泥及降低地層污損等問題。

一、背景說明

所謂地層污損是在鑽井、完井或修井作業時，因鑽井泥漿、濾液或鑽鑿固粒等侵入生產層，改變了生產層的特性，造成生產率降低的結果。地

層污損幾乎在所有鑽井工程皆曾發生，只是影響程度的大小各有不同而已，例如在低壓地層的鑽井作業，若差壓增高，就需特別留意地層污損的預防。此外，地層污損之成因包括：

- (一)鑽井泥漿污損：即鑽井泥漿入侵地層孔隙或裂隙，例如鑽鑿裂縫型生產層，特別是地層裂縫多，滲透率良好時，泥漿容易進入地層而造成地層污損。
- (二)泥漿濾液污損：泥漿濾液單獨或伴隨著微細固粒，可能對生產造成嚴重的損害。
- (三)循環量及差壓：會造成泥漿或濾液進入地層之最重要因素就是差壓，如果泥漿柱壓和地層壓力的差距保持最低，則形成漏泥的力量也最低。
- (四)起下鑽之擠壓或抽刷作用：下鑽時，管串下降將泥漿置換出來，如果下鑽太快，泥漿來不及送出即遭衝擊壓擠入地層。起揚時則作用力相反，抽刷力太大則會將地層流體抽出，又將泥壁破壞，然後使泥漿更容易侵入地層。

最經濟且有效的降低地層污損之方法，就是從源頭避免它的發生。因此在瞭解地層污損的成因後，本研究將詳加探討目前國外常用的地層污損預防方法，包括負壓鑽井技術、控壓鑽井技術與低污損鑽井泥漿等，以篩選出合適且具經濟效益之低層污損預防方法，以供現場單位參考。

二、研究技術說明

(一)地層污損預防方法探討

地層污損是造成生產井產能降低的主要原因之一。降低地層污損之方法，首先必須強調污損之防止，最有效的方法就是避免它的發生，這是最經濟有效的。要減少地層污損發生，必須從選擇泥漿種類、各種添加劑和地層流體的親和性、鑽井及完井的操作要件等詳加探究。地層污損之預防方法可分為機械因素、水力學因素與化學因素等，將在研究報告中探討。

(二)負壓鑽井技術(Underbalance Drilling) 研究

根據天然氣研究學會(Gas Research Institute, GRI)研究結果，在某些地層以負壓鑽井；亦即控制井底壓力小於孔隙壓力鑽進時，有許多優點，例如可降低鑽井/完井成本及增加生產率。

負壓鑽井之優點：

- 1.增加鑽進率和鑽頭使用壽命。
- 2.減少卡鑽之機率。
- 3.降低漏泥。

- 4.增加生產率。
- 5.降低地層污損。

負壓鑽井的選定評估、設計及計劃。主題可歸納如下：

- 1.負壓鑽井技術介紹：空氣、氮氣、霧氣、穩定泡沫、硬泡沫、氣化液體和密閉循環系統。
- 2.負壓鑽井技術之評估及選擇。
- 3.負壓鑽井之設計及計劃。
- 4.負壓鑽井之益處。
- 5.在頓鑽鑽井、定向鑽井、下水泥及地層評估等作業時，安全及環境之特別考量。

(三)控壓鑽井技術 (Managed Pressure Drilling ; MPD) 研究

控壓鑽井技術是當今世界鑽井工程先進技術之一，主要是通過對井孔環孔壓力的閉環即時監測與精確控制，減少井噴、漏泥等鑽井工程事故，是當前解決狹窄鑽井窗鑽井難題最有效的手段。其核心裝備和技術一直掌握在少數國外服務商手中，服務費用昂貴。

未來控壓鑽井技術發展的目標是在鑽井過程中，能夠自動隨鑽監測環孔壓力剖面，反饋至地面後能自動調整流量和回壓等控制參數，實現環孔壓力的閉環監測與控制。

這一技術是通過井底隨鑽測壓設備、井口旋轉控制器、地面自動節流歧管、回壓補償循環系統等手段，來減少井底壓力波動與保持井底壓力更平穩，可有效解決窄壓力視窗地層又漏又噴的問題。

控壓鑽井技術主要利用密閉式循環流體系統，使井底壓力接近地層孔隙壓力(可稍高或低，視實際需求而定)，以降低無效益時間(Non-Productive Time, NPT)，減少鑽井事故，進而最佳化鑽井作業。

(四)低污損鑽井泥漿配方評估

本評估技術係從實驗室分析瞭解低污損鑽井泥漿之性能與特性，並透過經濟分析瞭解其成本效益，以作為現場單位工程施作與藥品採購之參考。主要研究流程如圖 1 所示。

1.現場泥漿配方分析

PHPA 泥漿係目前本公司於國內陸上鑽井最常使用的泥漿系統，此泥漿系統具有極佳的頁岩抑制性，除此之外，其優點尚包括：

- (1)低污染性，環境友善。

- (2) 包覆頁岩，防止其吸水膨脹。
- (3) 有效降低脫液量。
- (4) 避免鑽屑溶散，使其易於攜帶至地表。

PHPA 泥漿之主要藥品包括 PHPA、Bentonite、Ex-Drill 與 PAC-R 等（魏明輝等，民國 81 年），茲簡述各藥品功能如下：

2. 鑽入泥漿配方分析

為避免地層污損問題，本公司於 CHK-146 首次採用鑽入泥漿系統，此泥漿系統主要優點包括：

- (1) 低環境影響。
- (2) 降低對固結不佳的淺層之井孔侵蝕。
- (3) 減少於多孔隙砂岩與裂縫碳酸鹽之漏泥。
- (4) 優異的井孔清潔力與鑽屑懸浮力。
- (5) 提高水馬力。
- (6) 降低非生產時間（non productive time）與提升鑽進率。
- (7) 避免儲集層污損。

鑽入泥漿主要藥品包括特殊 Bentonite、頁岩穩定劑與脫液控制劑，茲簡述各藥品功能如下：

- (1) 頁岩穩定劑：為一種混合金屬氧化物（mixed metal oxide, MMO），主要作為特殊 Bentonite 之補充劑（extender）與頁岩穩定劑，可與其形成複合物，主要功能為提高鑽屑攜帶力與懸浮力。此藥品對分散劑（dispersant）與陰離子聚合物（anionic polymer）（如 PAC-R 或 CMC）十分敏感，一旦接觸將破壞其流變性質（rheological property）。
- (2) 特殊 Bentonite：為一種經過特別篩選且未經處理的鈉質土般土（sodium bentonite），主要功能係確保水化後能使頁岩穩定劑吸附於其上，以形成穩定且紮實的複合物（complex），此複合物將提供鑽入泥漿一致的剪力稀釋（shear-thinning）流變性質，例如低塑性黏度（plastic viscosity）、高屈服值（yield point）與非漸進式的膠黏力（gel strength）。在避免地層污損方面，此複合物亦為極佳的橋接劑（bridging agent），可有效降低泥漿固粒污損儲集層，而低轉速（3 與 6 rpm）時之高黏度可提供良好的井孔清潔力與懸浮性質，亦可防止流體流入地層裂縫與孔隙中。此外，越穩定且紮實的複合物將可降低鑽入泥漿對於陰離子化合物（anionic compound）、鹽與其他污染物之敏感度。
- (3) 脫液控制劑：為一多醣類衍生物（polysaccharide derivative），主要功能為控制鑽入泥漿之脫液且不影響其流變性質。此藥品可耐溫達 250°F（120°C），並適用於海水（需先去除硬度）與其他可使用澱粉與纖維素添加劑之泥漿系統，並不受細菌劣化（degradation）之影響。

三、研究成果

(一) 地層污損之預防方法

1. 機械因素方面

- (1) 起下鑽速度控制在適當值。
- (2) 裸孔地層測驗採用負壓鑽井法。
- (3) 下套管速度需控制在適當值。
- (4) 完井及修井使用之鹽類流體必須過濾。
- (5) 作防砂處理，例如採用礫石填充（Gravel Packing）方式完井。

2. 水力學因素方面

- (1) 儘量使柱壓及地層壓力差減至最低，例如能採用負壓鑽井最為理想。
- (2) 減少裸孔之鑽鑿期間，縮短裸孔浸泡泥漿之時間。
- (3) 操作時注意事項：起動泵壓要低，再緩慢提高泵壓，使打破泥漿靜止增粘性之壓力不致於偏高。泥漿性質維持操作所需之最低粘度，最低泵速及低比重。

3. 化學因素方面

化學因素為預防污損之重要因素之一，任何進入生產層的外來流體都會造成污損，如何使其影響減至最小為考慮重點。

- (1) 實驗室作業：各項實驗，包括粘土之膨脹性、微細固粒之移棲試驗，地層流體之潤濕性及比重對滲透率之影響、乳化及起泡之趨勢、膠粘性流體之粘度改變試驗、各種流體和互間之親和性等。在完成適當的評估程序後，才能選定最適合的鑽井、完井作業方法。
- (2) 粘土膨脹之抑制：添加適當的鹽類，如 KCl、NaCl 等及聚合物即可獲得所需的抑制性。
- (3) 微細固粒之抑制：可添加陽離子有機聚合物以抑制之。
- (4) 預防結垢（scale prevention）：可泵入適當的防垢劑。添加殺菌劑以抑制細菌的繁衍。

選擇合適的鑽入泥漿系統鑽鑿生產層，使鑽鑿期間對地層的污損可以減至最低。選擇鑽入泥漿的考慮因素最重要的是鑽入泥漿和生產層及完井方式之親和性，以及對該種鑽入泥漿的使用紀錄作適當的評估。

(二) 負壓鑽井技術研究

1. 負壓鑽井技術

有很多不同技術能確保達到預期的負壓條件，目前，主要的方法是控制泥漿的比重，使泥漿在環孔內形成的靜液柱壓力低於地層孔隙壓力，而

泥漿可以是單獨的氣相或液相，也可以是氣液兩相混合。氣相和氣、液兩相泥漿可人工誘導產生負壓條件，而液相泥漿可利用地層較大的壓力而自然形成負壓條件。負壓鑽井技術經過幾十年的發展，至目前，國外已經發展了空氣鑽井、氮氣鑽井、天然氣鑽井、霧化鑽井、泡沫鑽井、充氣泥漿鑽井、邊噴邊鑽等多種負壓鑽井技術（T. Walker, and M. Hopmann, 1995）。茲簡述如下：

- (1) 空氣負壓鑽井技術：是指以空氣作為介質進行負壓鑽井，是最早發展的一種負壓鑽井技術。由於該技術是直接使用大氣中的空氣，所以可較節約鑽井材料費用（W. C. Lyons, 1984）。
- (2) 氮氣鑽井技術：在負壓鑽井中，氮氣能用作泥漿，或作為泥漿的一種組成成分。主要的優點勝過空氣鑽井，因氮氣和煙氣的混合物不易燃燒，這樣，可消除井下著火的可能性。
- (3) 天然氣鑽井技術：在天然氣鑽井中，使用天然氣如同使用氮氣或使用空氣一樣，可用作負壓鑽井的介質。不同於氮氣或空氣，天然氣排放到大氣中時，一定會形成一種易燃的混合物，具有較高的地面著火潛在危險。
- (4) 霧化鑽井技術：在空氣鑽井程序中，如出現少量的地層水流，通常作法是將空氣鑽井轉變成霧化鑽井。霧化鑽井的具體作法是，在壓縮的空氣流未注入之前，注入少量的含有起泡劑的水。注入的這種液體與地層產出的水就會分散成不連續的（獨立的）液滴的霧，這種霧流速度與氣流速度相同。
- (5) 泡沫鑽井技術：泡沫可用作鑽井的流體，泡沫流體為氣、液兩相構成的乳化液，它具有靜液柱壓力低、漏失量小、攜屑能力強、對油氣層損害小等特點。適用於低壓、易漏泥、水敏性地層、泡沫鑽井技術是目前國外應用較為廣泛的一項鑽井技術。
- (6) 充氣泥漿鑽井技術：雖然充氣泥漿很早就用於油氣工業，但是，在50年代早期在美國猶他州的 Emery 郡才第一次使用充氣泥漿鑽井。當時，是使用充氣泥漿作為泥漿，主要用途是避免因使用泥漿鑽井時的漏泥，而不是特定用於負壓鑽井，近年來，由於水平井鑽井的迅速發展，為了避免水平鑽井中的地層損害，在加拿大、美國及世界上其它地區，充氣液體已被用於水平鑽井。
- (7) 邊噴邊鑽技術：隨著負壓鑽井技術的進一步發展成熟，發展了高壓地層負壓鑽井技術，這種技術國外稱為 Flow Drilling（邊噴邊鑽）。

國外目前負壓鑽井技術用於鑽直井外，也應用於鑽水平負壓井（圖 2），多數用於鑽開發井。本研究探討負壓鑽井技術之三種方法：(A) 空氣鑽井（Air Drilling）技術、(B) 泡沫鑽井（Foam Drilling）技術及 (C) 充氣泥漿鑽井（Aerated Mud Drilling）技術等，此三種方法各有其優劣及適用條件。

負壓鑽井技術中以泡沫鑽井技術及充氣泥漿鑽井技術較普遍及實用，

因為(A)泡沫鑽井比空氣鑽井所需能量較小，空氣鑽井所需環孔流速較高，容易產生沖蝕問題；而泡沫鑽井則不需較高的環孔流速，不會產生沖蝕的問題。另外泡沫鑽井對於地層生產的水較容易移除。(B)因為充氣泥漿鑽井技術具有比重可自由調整、無漏泥不循環之現象、因為保持柱壓與地層近乎平衡狀態鑽井，故不致發生漏泥後地層受侵污及堵漏使地層之孔隙與通路受堵塞、因泥漿柱壓與地層壓力之差壓小，可避免差壓黏卡之卡鑽意外事件等優點。

雖然泡沫鑽井具有上述之優點，但泡沫從井內流出後，必須丟棄，不能再循環使用會造成浪費及回收處理問題。又充氣泥漿鑽井雖有上述之優點，但亦有其使用之限制或下列之缺點：由於接近地面之環速極高，為避免泥漿沖蝕井孔及可能影響底座安全，必須下完套管至約 600 公尺後，進入生產層前，始可考慮使用充氣泥漿鑽井、僅適用於硬地層及出水問題較少之地層、較容易產生管串沖蝕及腐蝕之問題，須有效解決。

巴西利用負壓鑽井優勢在老油田鑽開發井獲得成功，在此取得經驗的基礎上，又將該技術用於 Parana 盆地鑽探勘井。該盆地位於巴西西南的延伸的高原地區。該盆地的地質特點是上部為堅硬的玄武岩，下部為低壓衰竭氣層。過去，由於一般鑽井對地層造成嚴重的損害，中途測試均告失敗。為了探測該地區的油氣層及油氣藏的分佈範圍，於 1995 年至 1996 年相繼鑽成了三口井（其中 2 口直井，1 口定向井）。鑽井中採用了泡沫泥漿和充氣泥漿，採用的密度為 5.01bm/gal (0.6g/cm^3) 和 7.21bm/gal (0.86g/cm^3)，負壓鑽井深度範圍為 150 m 至 3,794 m，鑽井所獲得的結果是：提高了上部堅硬玄武岩的機械鑽進率，鑽進率為一般鑽井的 2~4 倍；對衰竭低壓地層無損害或損害極小；獲得了較好的測井結果。

是否適合採用負壓鑽井需要注意兩個主要因素，一為地層岩石引張強度，負壓之情況，移除了部份的裸孔壓力，井孔容易被沖蝕崩塌；另一個因素為是否有足夠的負壓鑽井設備，可以達到控壓制噴之目的。負壓鑽井會導致地層液體或氣體侵入井孔，此時必須將流體循環至井口加以控制並在地面予以妥善處理。

採用負壓鑽井前，須作好地層壓力之判斷及預測，以便決定鑽井泥漿比重及套管設計。一般而言，地層壓力隨著深度增加而遞增，因各地區之地層層次錯綜複雜，深部地層壓力較淺部為低者，亦比比皆是，擬定泥漿及套管計畫時不可不慎。

負壓鑽井之鑽井設備、防噴系統、流體處理系統及注氣系統等，都有其特殊設計考量，考慮因素包括鑽遇地層特性、鑽井泥漿種類及所需處理之地層流體。採用負壓鑽井須有空氣鑽井之設備，如空壓機、旋轉鑽進器、氣量計、藥液泵 (Chemical Pump) 及管串浮閥等，另外尚須添加之空氣泥漿分離器 (Separator) 及噴射接頭 (Jet Sub)、防噴系統、流體處理系統及

注氣系統等設備。若是使用負壓鑽井頻率高，則可考慮採購這些負壓鑽井設備，若僅是偶爾使用，則不符經濟效益。

(三) 控壓鑽井技術 (Managed Pressure Drilling ; MPD) 研究

1. 控壓鑽井 (MPD) 技術之原理、優點與特性及施工方法

控壓鑽井技術主要係將油氣層分析技術、鑽井技術、鑽井流體、鑽井工程設計和最齊全的控壓鑽井設備等整合應用，以提高鑽井效率和油氣層特性，進而以較低的鑽井費用獲得較高的產能。主要利用密閉式循環流體系統，使井底壓力接近地層孔隙壓力 (可稍高或低，視實際需求而定)，以最小化無效益時間 (Non-Productive Time, NPT)，減少鑽井事故，進而最佳化鑽井作業 (D. Xu, U. Sarasto, K. Fisher, and A. Houlbrook, September, 2007)。

上述控制壓力鑽井技術均需使用旋轉控制器、鑽進節流歧管與多相分離器等三項特殊設備，各項設備之功能說明如下：

(1) 旋轉控制器 (Rotating Control Device ; RCD)

功能類似傳統防噴器，但其關閉後仍可繼續旋轉鑽進。

(2) 鑽進節流歧管 (Drilling Choke Manifold ; DCM)

主要的功能在於排除鑽進過程中產生之鑽屑。

(3) 多相分離器 (Multiphase Separator)

視所採用的鑽井流體而異，主要將循環出的流體進行多相分離，並重新調配後，再繼續循環與鑽進。

2. 微滲流控制之控壓鑽井技術 (MFC MPD)

自 2006 年 8 月以微滲流控制之控壓鑽井技術 (Micro-Flux Control Managed Pressure Drilling ; MFC MPD) 鑽鑿第一口井以來，這個方法已分別採標準模式 [泥漿比重為超壓 (hydrostatically overbalanced)] 及特殊模式 [泥漿比重為負壓 (hydrostatically underbalanced)] 應用在許多口井。這些井係以比重達 18 ppg 之水基或油基泥漿鑽鑿，包括海上與岸上之探勘與開發。模式轉換的靈活度與容易度允許作業者依井況、鑽井問題、鑽機性能、團隊能力與其他條件選擇適合的配置。

3. 控壓鑽井技術在中國衡 6 井之應用

中國華北油田古潛山碳酸鹽地層屬於低壓易漏地層，地層壓力係數一般在 0.95~1.05 之間，採用傳統鑽井在古潛山碳酸鹽生產層有多口井發生漏泥等情況，經常發生嚴重漏泥而造成巨大經濟損失。採用 1.01 g/cm³ 的清水泥漿鑽進，共計漏失泥漿 15,000 餘立方公尺，漏速達到了 70~90 m³/h。多次採用水泥堵漏和橋堵技術結合才堵漏成功，處理漏泥時間長，耗費物資量大，嚴重影響了鑽井施工並造成生產層傷害。(周英操等，民國 97 年)

衡 6 井位於華北油田，設計井深 2,200 m，該油氣田主要以寒武系一薊縣系碳酸鹽孔隙—裂縫型介質儲集層。該油田多年來勘探一直未得到具有開發價值的工業油氣蘊藏，預測地層壓力梯度僅 0.94，採用傳統鑽井在寒武系碳酸鹽生產層漏泥嚴重，這樣不但增加鑽井作業成本，同時大量漏泥，造成嚴重的地層傷害，亦會降低勘探成功率。原設計採用負壓鑽井，由於井下情況出現變化，地層出水嚴重，污染水包油泥漿，泥漿比重稍大又發生漏泥，為解決以上漏失問題，決定採用控壓鑽井（MPD）來避免寒武系一薊縣系碳酸鹽地層的嚴重漏泥風險，並即時發現和保護儲集層，提高勘探率和勘探精確度，以取得較好的應用效果（劉超等，民國 98 年）。

4. 控壓鑽井之風險及可行性評估

石油探勘越來越困難，新發現油氣田越來越不容易，須積極提昇石油鑽探技術，以及提高國內或海域油氣田的採收率。Weatherford 公司成功應用控壓鑽井（MPD）技術於 Rowan Gorilla 鑽井船上，探勘挪威北海大陸棚的實際例子，本井共節省 7,500,000 美元（S.K. Naesheim et al., 2011），“Mandarin East” 井是屬於高溫和高壓的環境（圖 3）。控壓鑽井（MPD）技術是在靜態平衡/過平衡條件情況下進行。該井鑽達垂深 5,933 公尺（RKB）的三疊紀地層。該井的位置，經精心挑選，以避免通過高風險的海床條件。為避開附近的鄰近井，“Mandarin East” 井較深且位置偏移。圖 4 為連續循環系統（CCS）之主要設備。

控壓鑽井技術需使用旋轉控制器、鑽進節流歧管與多相分離器等三項特殊設備，尤其旋轉控制器（Rotating Control Device；RCD）最重要，功能類似傳統防噴器，但其關閉後仍可繼續旋轉鑽進。控壓鑽井技術最常被應用的是維持井底壓力法（CBPM）適用於大位移井、高溫高壓井或小井眼井等。圖 5 為 Shell 公司之 DAPC 系統可維持固定的井底壓力（BHP）。

相較於傳統的超壓鑽井技術（Overbalanced drilling），控壓鑽井技術在鑽井時能夠分辨生產力較佳的生產層，且能降低鑽井流體對儲集層產生的污染與危害，進而造就較高的生產率（Xu et al., 2007）。

藉由健全的風險管理系統均可有效地克服上述技術限制所產生之風險，進而使得控壓鑽井的施作更加順利與安全。控壓鑽井專案之風險管理，目的在確保施作控壓鑽井前，解決所有的風險問題，以系統方法達到成功的控壓鑽井。

控壓鑽井係利用井口的旋轉控制器在鑽進過程中，將壓力隔絕並產生回壓以控制井底壓力，故能有效改善卡鑽及漏泥等鑽井問題，降低鑽井風險與成本。

不管採用那一種施工方法，應用控壓鑽井技術時，鑽井循環系統的監控模擬均極為重要，圖 6 為“Mandarin East” 井控壓鑽井之監控模擬系統，監控模擬系統測得超過地層破裂壓力會發出警訊。

Weatherford 公司為目前國際石油工程界應用控壓鑽井技術最多且最先進的公司，擁有業內最全的控壓鑽井設備 (F. Kernche et al., 2011)。故以後要引進控壓鑽井技術時，可聘請該公司技術指導或代訓鑽井工作人員。

(四)低污損鑽井泥漿配方評估

1.基本性質試驗

本試驗除分析原始配方外，亦考量添加加重劑後之基本性質變化，其中因原廠建議低比重時先以碳酸鈣作為加重劑，故在鑽入泥漿系統方面，比重 1.3 之鑽入泥漿分為重晶石與碳酸鈣兩類，而 PHPA 則依據目前現場配製方式，僅以重晶石做為加重劑

試驗結果 (表 1) 顯示相較於 PHPA 系統，鑽入泥漿系統具有較高的黏度，顯示其可提供較佳的懸浮力。此外，兩系統均有良好的脫液控制能力。在添加加重劑方面，加重劑對於 PHPA 系統之流動性質影響十分有限；對鑽入泥漿系統而言，不同的加重劑則會形成截然不同的流動性質，特別是添加碳酸鈣，屈服值高達 92，膠黏力亦高達 64/89，此結果顯示碳酸鈣應為現場使用時造成泥漿不易流動之主因。此外，鑽入泥漿系統普遍具有較高的 Cl⁻ 濃度 (1,435~1,800 ppm)，在使用時需特別注意，以避免誤判為地層鹽水入侵。

2.水泥污容忍度試驗

本公司出磺坑 146 號井初次採用鑽入泥漿系統，但於 2,250~2,500 公尺下 4½ in 套管時遭遇嚴重的水泥污染問題，使得泥漿性質頓時惡化，甚而黏稠至無法以小蘇打處理，致使泥漿損失甚鉅，而後續的清理亦造成人力與物力之耗費。

本試驗將分為泥漿系統與加重劑兩個方面探討水泥污容忍度，衡量指標包括：黏度、膠黏力、脫液量、脫液中的 Ca²⁺ 濃度與 pH 值等。

- (1) 泥漿系統方面，試驗結果顯示鑽入泥漿系統易與水泥乳均勻混合，顏色較一致，但 PHPA 泥漿系統對水泥乳具有輕微的包覆作用 (圖 7)，致使水泥乳不易與其混合，攪拌後仍在溶液中形成黑色斑點。隨著水泥添加量的增加，無論何種泥漿系統之塑性黏度、屈服值、膠黏力、pH、脫液與 Ca²⁺ 均呈現上升的趨勢，但少量的水泥污就會造成鑽入泥漿系統之流動性質劇烈變化 (圖 8 與圖 9)，顯示此系統具有較低的水泥污容忍度，因此建議未來下水泥前應先置換回 PHPA 泥漿，以避免泥漿材料之浪費。
- (2) 加重劑方面，隨著水泥乳含量增加，兩者之顏色均逐漸加深，且黏度均不斷提高，但以碳酸鈣為加重劑之樣本已逐漸黏稠至難以攪拌。以重晶石為加重劑之樣本試驗結果與原配方之試驗結果類似，塑性黏度、屈服值、膠黏力、pH、脫液與 Ca²⁺ 均呈現上升的趨勢。

以碳酸鈣為加重劑之樣本試驗結果顯示其與水泥乳混合後，黏度即迅速上升，當水泥乳含量超過 1%，即無法以范氏黏度計測量其流動性質，而 pH、脫液與 Ca^{2+} 亦逐漸上升。由試驗結果可知，以碳酸鈣做為加重劑，在未受水泥汙之前，已具有較高的黏度，而遭受水泥汙後，其流動性質惡化亦較快速。

3. 儲集層岩性分析

本研究旨在建構地層污損試驗評估方法，因此現階段將僅針對目前已採用鑽入泥漿之探井進行儲集層分析，以瞭解目標層次之岩性，並篩選適合執行地層污損試驗之岩心樣本。本公司目前採用鑽入泥漿鑽鑿生產層之探井僅出磺坑 146 號井 (CHK-146) 與出磺坑 147 號井 (CHK-147)，其儲油氣層包括 CHK5、CHK6Z、CHK6 與 CHK6-1，茲簡述各層次岩性如表 2 所示：

CHK-146 與 CHK-147 之儲集層於 CHK5 (碧靈頁岩) 與 CHK6Z (木山層頂部) 係以細粒與極細粒砂岩為主，其中並夾雜著部分頁岩層；而隨深度加深至 CHK6 與 CHK6-1 (木山層) 後，砂岩比例逐漸提高，顆粒大小亦逐漸增大，但其岩心分析結果指出其滲透率偏低，最高僅 20 mD，顯示岩心孔隙不易受地層污損，污損應係發生於岩層裂隙。

4. 地層污損試驗

鑽井泥漿所引發的地層污損機制包括液相間的不相容、岩石與液體間的不相容、固粒入侵、相阻塞、可濕性變化與生物作用等，上述作用所造成之最終結果均為滲透率下降，至使油氣不易甚至無法自地層中流出，因此本評估技術將以地層反應評估試驗儀測試岩心樣本暴露於鑽井泥漿之滲透率變化。

在岩心樣本選擇方面，因出磺坑礦場岩層過於緻密，岩心分析結果顯示氣體滲透率僅 20mD，為確保本評估技術之有效性，將以標準岩心 (Berea Core) 進行地層污損試驗。

因採用標準岩心，性質較一致，量測結果顯示樣本岩心之原始滲透率均約為 430mD，以 PHPA 系統進行污損後之滲透率約 89.7mD (圖 10)，相較於污損前約下降 79.1%；以鑽入泥漿系統進行污損後之滲透率約 170.6mD (圖 11)，相較於污損前約下降 60.3%。兩系統之地層污損結果相差約 18.8%，顯示在原配方方面，鑽入泥漿系統具有較佳的防止地層污損能力。

5. 成本分析

成本分析係依據現場部門與鑽入泥漿之原廠提供之配方與價格，分別計算出此兩種泥漿之單位成本 (元/公秉)，以分析何者較具價格優勢。

PHPA 泥漿系統之單位成本約 709 元/公秉；鑽入泥漿系統之單位成本約 7,420 元/公秉，顯示鑽入泥漿之單位成本約為 PHPA 之 10.5 倍。此外，

因鑽入泥漿係於鑽達目標層才開始使用，若非密集鑽井（如 CHK-146 與 CHK-147），可能需重新配製，實際成本應與此計算結果十分接近，但 PHPA 泥漿係於鑽井初期即採用，後期僅視工程狀況進行藥品的增補，若全程採用 PHPA 泥漿實際成本將更低。

6.綜合評估

基於上述基本性質試驗、水泥污容忍度試驗、地層污損試驗與成本分析，PHPA 泥漿系統與鑽入泥漿系統之綜合評估結果如表 3 所示。鑽入泥漿系統具有較佳的抗地層污損能力，但單位成本較高，且水泥容忍度低，下水泥前需先置換泥漿，以避免泥漿材料之耗費。

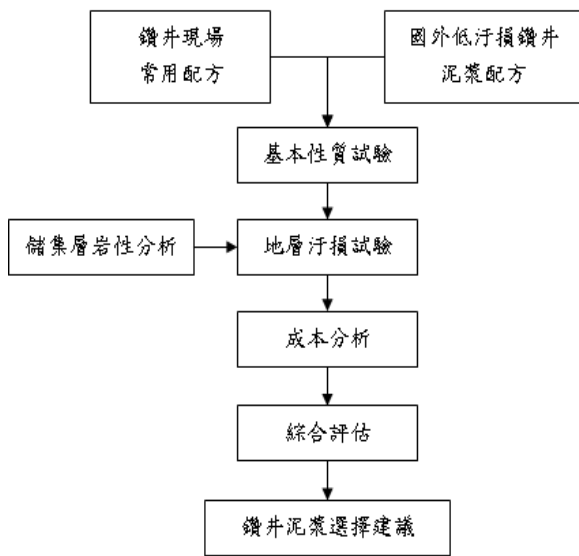


圖 1、低污損鑽井泥漿評估流程

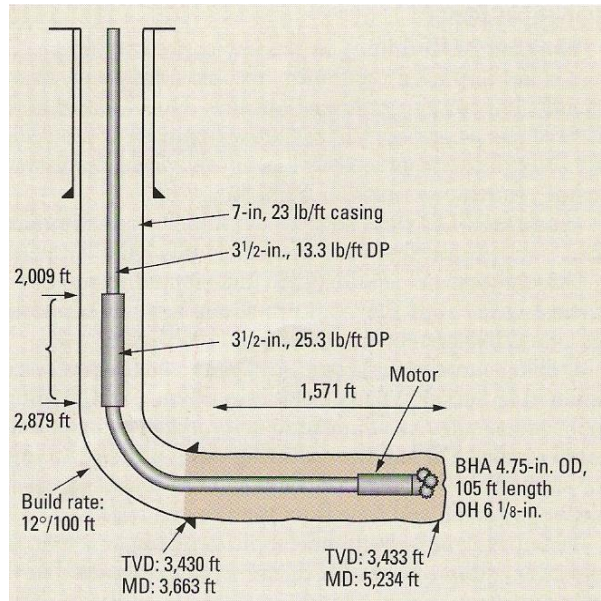


圖 2、水平負壓鑽井示意圖

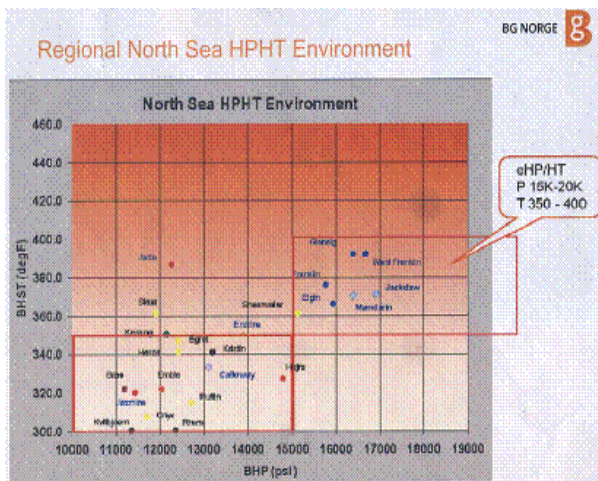


圖 3、“Mandarin East”井屬於高溫和高壓的環境

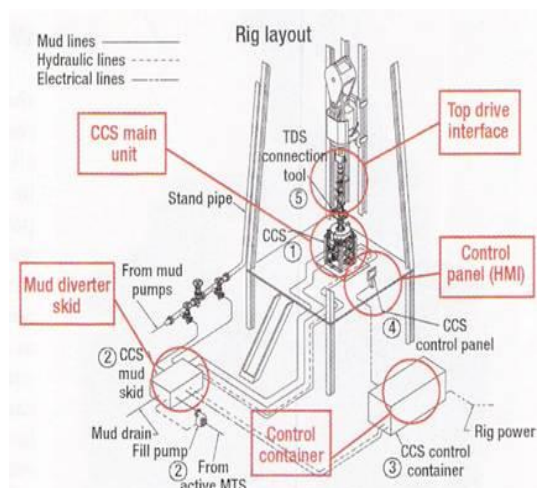


圖 4、連續循環系統(CCS)之主要設備

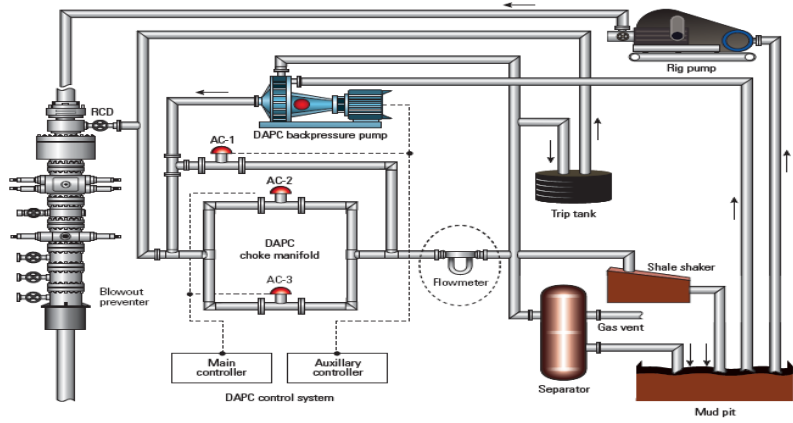


圖 5、DAPC 系統可維持固定井底壓力(BHP)

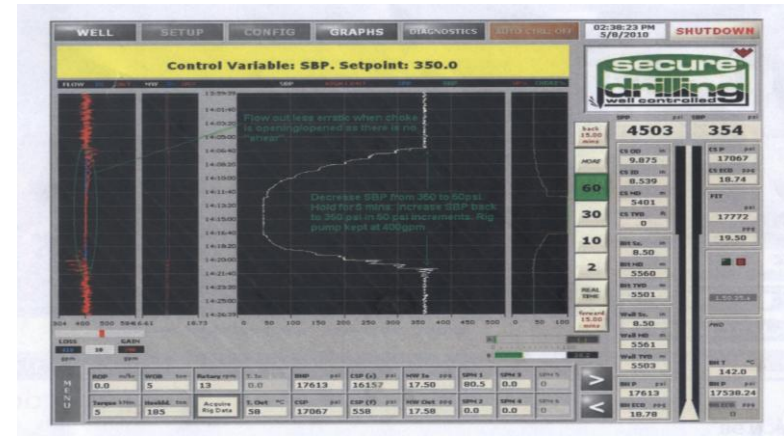


圖 6、“Mandarin East” 井控壓鑽井之監控模擬系統



圖 7、低污損鑽井泥漿評估流程

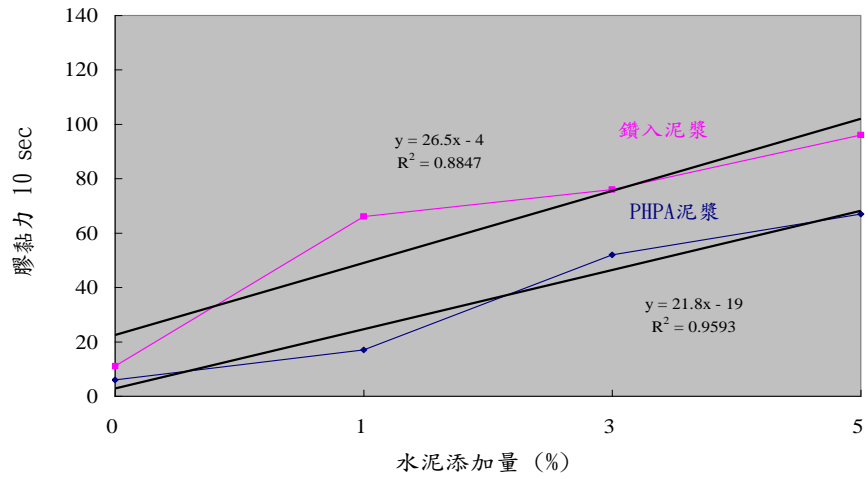


圖 8、水泥污容忍度比較 (屈服值)

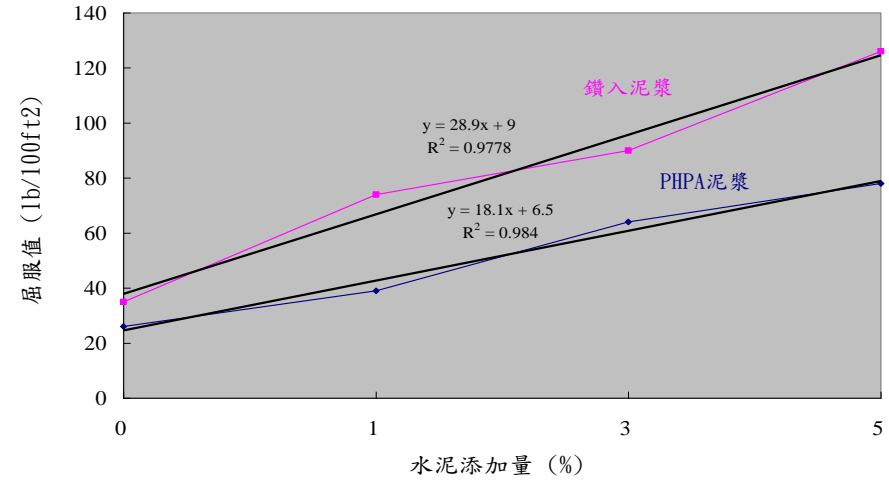


圖 9、水泥污容忍度比較 (膠黏力)

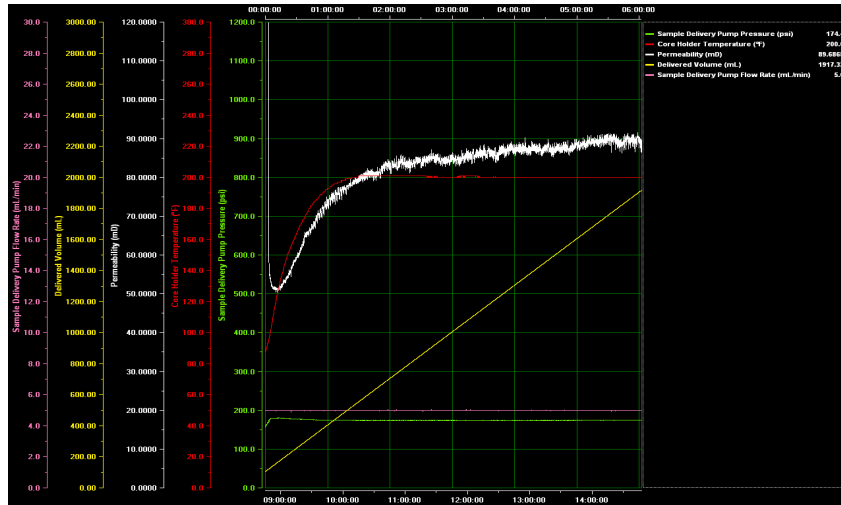


圖 10、污損後之岩心滲透率 (PHPA)

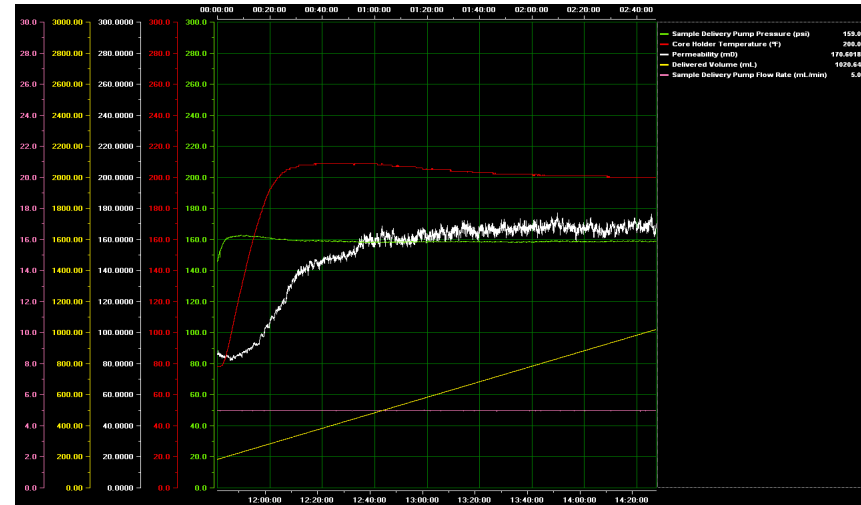


圖 11、污損後之岩心滲透率 (鑽入泥漿)

表1、基本性質試驗

	PHPA 原配方	PHPA (重晶石)	鑽入泥漿 原配方	鑽入泥漿 (重晶石)	鑽入泥漿 (碳酸鈣)
比重 (S.G)	1.02	1.3	1.01	1.3	1.3
θ 600	80	85	89	173	190
θ 300	53	51	62	127	141
塑性黏度 (cP)	27	34	27	46	49
屈服值 (lb/100ft ²)	26	17	35	81	92
膠黏力 10sec/10min	6/16	3/5	11/42	29/48	64/89
pH	11	10	11.5	11	11.5
脫液 (mL)	9	7	9	6.6	8.5
高溫高壓脫液 (mL)	10	10	13.8	10	10
Ca ²⁺ (ppm)	40	20	-	20	8
Cl(ppm)	137.5	97.5	1480	1800	1435

表2、儲集層岩性分析

儲集層	岩性
CHK5 (碧靈頁岩)	以白灰色至深灰色、次稜角狀至次圓狀之細粒與極細粒砂岩為主(約 50%~70%)，並夾雜灰色與深灰色次平板狀至次塊狀之頁岩。
CHK6Z (木山層)	以白灰色至淡灰色、次圓狀之細粒與極細粒砂岩為主(約 40%~55%)及部分褐灰色緻密粉砂岩，夾雜灰色與深灰色、次平板狀至次塊狀之頁岩，並隨深度加深，頁岩比例逐漸提高至 70~85%。
CHK6 (木山層)	以白灰色至淡灰色、次圓狀之細粒、極細粒與少量粗粒砂岩為主(約 50%~90%)，淘選良好，並夾雜灰色與深灰色次平板狀之頁岩。
CHK6-1 (木山層)	以白灰色、淡灰色與少許褐灰色、次圓狀至次角礫狀之細粒至中粒塊狀砂岩為主(約 50~60%)。整段岩心無明顯層理，可見生痕化石及裂隙充填之方解石，並含少量黃鐵礦及碳質物。

表3、綜合評估

	PHPA 系統	Drilpelx 系統
基本性質	<ol style="list-style-type: none"> 1.良好的脫液控制能力。 2.加重劑對黏度影響有限。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.屈服值較高，黏度較高。 2.良好的脫液控制能力。 3.若以碳酸鈣為加重劑，黏度會驟升，至使泥漿不易流動。 4.具有較高的 Cl 濃度，應避免誤判為地層鹽水入侵。
水泥污容忍度	<ol style="list-style-type: none"> 1.對水泥乳有輕微的包覆作用。 2.水泥污容忍度較高。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.鑽入泥漿系統易與水泥乳均勻混合。 2.脫液量增加較慢，屈服值與膠黏力上升較劇烈。 3.若以碳酸鈣為加重劑，將對水泥污更為敏感。 4.水泥污容忍度較低。
地層污損試驗	地層污損狀況較嚴重，約使滲透率下降 79.1%。	地層污損狀況較和緩，約使滲透率下降 60.3%。
成本分析	單位成本約 709 元/公秉。	單位成本約 7,420 元/公秉，約 PHPA 系統之 10.5 倍。