

國內礦區敏感性地層之井壁穩定度研究

黃啟倫、張國峯、王文烈、朱正文、林章凱、陳冠志、黃德坤

台灣中油股份有限公司探採研究所

摘要

本計畫整合鑽井日報、井下地質報告、電測柱狀圖、生產報告及鑽後報告，包含油氣井、變質岩地熱井及火山型地熱井，並依據個別地層之裸孔階段卡阻發生成因及頻率進行排序。為找出各種誘發卡阻之因素，本計畫進行更深入之卡阻分析，接續逐次將卡阻列出對應之卡阻類型、阻力、泥漿性能、井斜及泥/頁岩比等，以卡阻發生當下之泥漿性能、工程紀錄及卡阻深度之岩性，進行相關性分析，包含泥漿性能異常分析、增角率異常分析、漏泥影響分析、泥漿浸泡時間分析及泥/頁岩比例分析等項目。

根據分析項目統計觀察到，卡阻成因可能同時存在多種異常狀態搭配時間因素所導致，因此本計畫以兩種方向的應對策略，首先對於時間因素，引進人造岩技術，用以模擬井壁於地層環境受到泥漿中水分，隨泥漿浸泡時間之應力變化趨勢與卡阻風險的關係；針對頁岩及高地層溫度造成之卡阻風險，引進新高分子聚合物泥漿配方進行補強，提供現場做為泥漿配方選擇之參考。

關鍵詞：卡阻成因分析、井壁穩定時間、高分子聚合物泥漿

一、背景說明

台灣陸上隨著城鎮發展，可作為鑽井井坪的場址選擇逐漸減少，造成新舊井共用井坪的情況逐漸增加，新井鑽遇久經生產之地層而產生之鑽井風險亦隨之上升，其主要風險來自於兩方面，其一，地層孔隙液壓過低將導致地層強度降低，泥漿窗口窄化左移，使得鑽進時難以即時調配鑽井泥漿，嚴重時甚或導致泥漿比重無法同時適用於同一鑽進區間之淺部及深部地層；其二，地層封閉情況複雜，即使生產資料證實地層孔隙液壓已大幅下降，仍可能含有殘留小範圍高壓區，當泥漿比重偏低時易造成井壁坍塌。目前台灣多數油氣田生產已久，探勘目標層逐漸往深部移動，其高地層溫度易造成泥漿性能劣化甚至膠化，使得鑽探風險逐年提升。因此，本計畫篩選敏感性地層作為研究主體，並將岩體強度分析及耐高溫泥漿配方研究作為減少卡阻風險之策略。

以錦水 84 號井為例，淺部鑽遇之地層包含東坑層、打鹿頁岩及碧靈頁岩等主要油氣產層歷經多年生產，其地層孔隙液壓均已低於靜水壓力，難以透過泥漿比重控制井壁穩定性(Rida, 2021)，同時須面臨殘留高壓氣層衝噴及裂隙漏泥的風險，其鑽探難度亦反映在卡阻發生次數上。木山層為錦水 84 號井油氣開發目標，由於其深度較深因此地層溫度偏高，根據栗林 1 號井及出磺坑 147 號井鑽井資料顯示，當鑽遇木山層時因泥漿長期受到地層加熱，循環散熱不足，導致泥

漿排屑能力與泥漿脫液能力有明顯劣化之現象。

圖 1 為台灣中油公司近年來油氣井及地熱井之卡阻次數統計，在工程上遭遇井壁塌陷的次數呈現逐年增加之趨勢。根據鑽井資料顯示，自 100 年的出磺坑 147 號井定向角度最高為 23 度、104 年鐵砧山注產井更提升到 46.5 度，除了定向角度增加外，同一地層之地層孔隙液壓逐漸降低，所造成的結果為卡阻的次數逐漸上升。在 108 年開鑽的錦水探井，其遭遇卡阻次數及工程難度更達到高峰，井程設計上不僅有高角度定向問題，連續卡阻對於未受套管及水泥保護之地層，亦造成工程的風險，引發本計畫的發想。本計畫針對卡阻風險機率較高的地層進行分析及提出建議，再發展出兩個方向進行研究，其一為敏感性地層岩體強度分析，藉由瞭解岩體強度遞降趨勢，優化完井設計；其二為敏感性地層之鑽井泥漿配方研究，優化泥漿耐溫及排屑能力，減少泥漿受到深部油氣層或地熱井之地溫劣化程度。期望作為國內後續相關鑽井施工之參考，並減少因鑽井卡阻造成之工程延宕及器材損失。

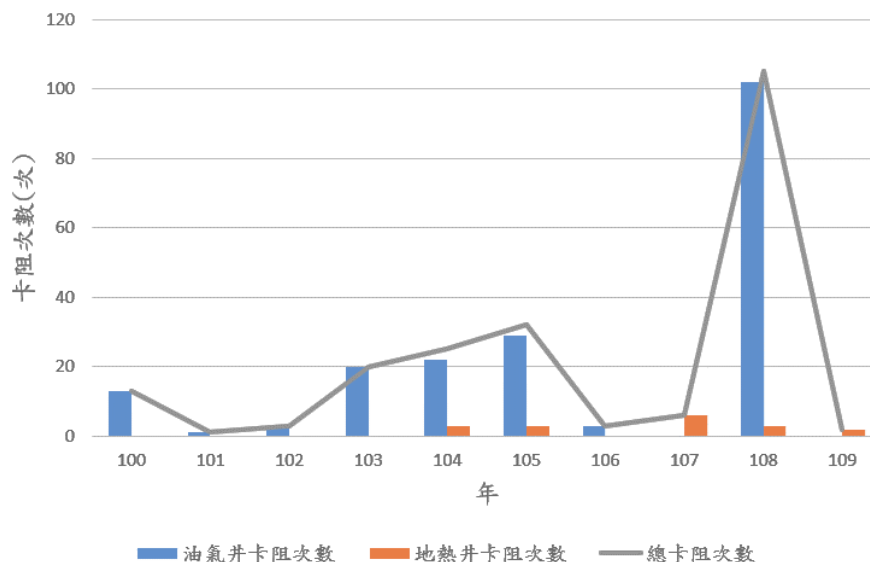


圖 1、台灣中油公司近年鑽井卡阻次數分析(100 年至 109 年)

(一)、文獻回顧

1. 敏感性地層篩選與分析

井壁穩定度為導致鑽井卡阻之主因，其餘尚包含鑽具設計及機械問題，如鑽具尺寸及井徑不匹配、鑽具脫落及動力系統故障亦為造成井況異常之原因，因此本計畫蒐集卡阻成因之時，首先需篩除與井壁穩定度、地層特性及地層碎屑等無關之卡阻。本計畫參考 Qi(2019)蒐集鑽井過程中所蒐集到的地質、井程設計、鑽井泥漿、鑽屑及工程狀況等，判斷卡阻發生之風險程度，並藉由累積的數據，調整鑽井泥漿及改善井程設計，減少卡阻風險同時提高鑽進速度及減少排阻時間。

2. 敏感性地層岩體強度分析

Nong(2017)以花崗岩與水泥製作的人造岩，進行水飽和風化實驗比較強度變化情況，其水飽和風化實驗，包含水飽和、冷凍及加熱流程。花崗岩總共進行 50 次實驗，其中每 10 次取樣量測單軸抗壓強度試驗，而人造岩則逐次量測單軸抗壓強度及不同圍壓條件，根據計算取花崗岩水飽和風化實驗之平均每次強度遞降率為 64 kPa，而人造岩分別在 0、30、60 及 90 kPa 圍壓下，其強度遞降率為 433、308、258 及 176 kPa，分別為花崗岩遞降強度的 6.8、4.8、4.0 及 2.8 倍，而圍壓越高其斜率則越接近花崗岩遞降強度斜率。Nong(2017)根據分析結果，認為有機會以人造岩預測花崗岩風化強度遞降趨勢(圖 2)。

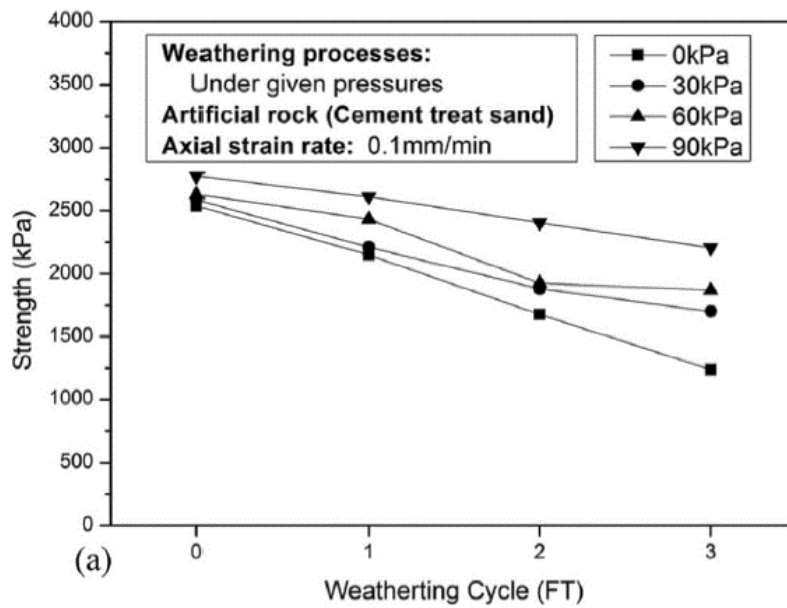


圖 2、人造岩風化實驗強度遞減分析(Nong, 2017)

表 1 為彙整前述人造岩製作方法文獻整理，其中多以石膏或水泥作為黏結劑且模擬原料為採用模擬目標之碎屑重製成人造岩之文獻，而試體以地層模型或岩心栓為主，其中試體為岩心栓，即受限體積較小需要採用較細之原料，避免混合不均勻的情況發生，可作為後續制定人造岩製程流程之參考。

表 1、人造岩製作流程文獻整理

研究者	模擬目標	原料	黏結劑	過篩(目數/孔徑 mm)	成品	目的
Johnston (1986)	墨爾本泥岩	水泥與泥岩粒料	水泥	6~7 (2.8~3.35)	地層模型	合成出具有均質且等向性的人造岩，而應力強度趨勢則藉由調整壓力控制之飽和水量、原料及水泥比例，以及水泥養護時間等因素，其結果用於挑選合適強度的泥岩應用於工程方面。
Gu et al. (1993)	霍克斯伯里砂岩	砂岩粒料	石膏	16 (1.0)	地層模型	控制壓模壓力使人造岩之應變應力接近目標岩石。
卿建業 (1995)	天然軟岩	皂土	石膏		地層模型	模擬材料對養護環境與濕度較敏感，必須在實驗進行中控制試體的環境狀況。
王乙翕 (2000)	卓蘭層砂頁岩	台中大坑砂岩及頁岩	水泥	40 (0.38)	岩心栓	完成模擬卓蘭層砂頁岩承載行為，確認相同方法之下，分別以砂岩及頁岩碎屑製成之人造岩，在莫耳-庫倫(Mohr-Coulomb)破壞包絡線表現上有所差異。
Tien, Y.-M. (2000)	軟弱互層岩體	渥太華砂與高嶺土	水泥	40 (0.38)	地層模型 再鑽取岩心栓	實驗過程中觀察到人造岩與數值模擬結果在力學性能上，包含強度、變形量、楊氏模數及蒲松比等，皆能符合趨勢。
鍾峻偉 (2001)	台灣中北部軟岩	卓蘭層及頭嵙山層之軟弱砂岩	水泥	30 (0.55)	岩心栓	鑽探取樣台灣中北部麓山帶卓蘭層及頭嵙山層的岩心栓，易受到膠結不良及遇水軟化的問題，為克服上述問題，以其碎屑製成人造岩，並確認天然岩石與人造岩試體於小應變範圍之應力-應變趨勢相符。
Nong & Towhata (2017)	以風化花崗岩模擬花崗岩	花崗岩碎屑	水泥	50~70 (0.212~0.3)	岩心栓	以花崗岩與水泥製作的人造岩進行水飽和風化實驗比較強度變化情況，根據分析結果，認為有機會以人造岩預測花崗岩風化強度遞降趨勢。
Can (2017)	天然軟岩	河砂	水泥、石膏及水泥硬化劑	16 (1.0)	地層模型	研究模擬人造岩的應力-應變行為，人造岩的單軸抗壓強度和破壞模量可隨著密度、水泥含量和石膏含量的增加而提升。
本計畫	錦水地區打鹿頁岩	打鹿頁岩鑽屑	水泥	40 (0.38)	岩心栓	研究錦水地區打鹿頁岩沙岩及頁岩段受到泥漿水分影響造成之應力強度變化。

3. 敏感性地層之鑽井泥漿配方研究

魏明輝(1993)彙整鑽進要點提出泥漿性質之建議：

泥漿性質需考量黏土水化抑制性、泥漿比重、泥漿黏度對應之排屑能力及固粒控制等。黏土水化抑制性為避免泥/頁岩溶散造成過多細小鑽屑，提高排屑難度。主要有兩種方式，其一為泥漿中添加陽離子如鉀、鈉離子，避免黏土礦物溶散，一價陽離子與黏土礦物結合力最好，其次是二價陽離子，同價數則以原子重量越輕結合力越好；其二為減少水分進行地層，即提升脫液水準，尤其深部油氣井，其地層溫度較高，容易造成泥漿成分劣化而使得脫液水準下降；泥漿比重為提供井壁支撐性，如泥漿比重過低則井壁將受到地層壓力壓迫而坍塌，反之泥漿比重過大，則造成地層受到井內壓力壓迫而產生地層裂縫；泥漿黏度會影響泥漿排屑能力，排屑能力並非越大越好，當泥漿循環由線流轉換到亂流，其泥漿排屑能力提升，惟井底周圍井壁亦會受到沖蝕而變形，對於後續工程施作會造成起下鑽串不順，甚至坍塌的風險；固粒控制為依賴泥漿除固粒設備及泥漿攜固粒能力，前者屬於機械能力，本計畫以後者為主，泥漿攜固粒能力為泥漿添加地層碎屑後，其對應之流動性質的變化。

因此，本計畫規劃後續泥漿試驗，除觀察各種條件下的泥漿流變性質外，另須進行泥/頁岩溶散實驗以及量測添加地層碎屑後造成之泥漿排屑能力的變化，以完善評估泥漿配方流程。台灣目前既有地熱井岩性分布，以變質岩或火成岩為主，加上地層壓力部分尚無發現異常高壓層，可著重於排屑能力為主。

二、研究技術說明

(一)、敏感性地層篩選與分析

鑽井日報為紀錄鑽井進度、泥漿性能及工況的報告，並以每日為單位留存，本計畫參考前人文獻可從鑽井日報獲得下列卡阻測深、工況敘述、卡阻類型、泥漿比重及流變性質等，並依據井別彙整記錄，蒐集井別依時間列順序，選擇依據為近期開發或有開發潛力之地區。

本計畫以裸孔階段進行卡阻及漏泥篩選，其原因為考量套管可提供井壁支撐力並隔離地層，下套管後管內發生之卡阻事件與井壁關聯性低。為找出各種誘發卡阻之因素，本計畫進行更深入之卡阻分析，接續逐次將卡阻列出對應之卡阻類型、阻力、泥漿性能、井斜及泥/頁岩比等，以卡阻發生當下之泥漿性能(非鑽遇卡阻深度)、工程紀錄及卡阻深度之岩性，進行相關性分析，包含泥漿性能異常分析、增角率異常分析、漏泥影響分析、泥漿浸泡時間分析及泥/頁岩比例分析。

(二)、敏感性地層岩體強度分析

根據本計畫敏感性地層卡阻風險分析，其風險度最高之地層為打鹿頁岩，因此，規劃分析之岩體強度目標設定為打鹿頁岩，並尋找具有打鹿頁岩之井下岩心栓、露頭及鑽屑，將試體外型統一設定為相同直徑及長度之圓柱體，減少形狀因

素影響抗壓強度分析結果。

本計畫規劃以井下岩芯、野外露頭及人造岩進行不同浸泡時間之泥漿浸泡實驗，並藉由岩石應力分析(含抗壓強度、巴西試驗及超音波試驗)，建立其岩石強度準則。在試體製備方面，井下岩芯及露頭可直接利用岩心栓鑽取機取得試體，在人造岩方面則須調整抗壓強度達到井下岩芯水準，規劃採用單軸抗壓強度作為標準，經由調整配方、養護及乾燥流程，以達到合適之人造岩強度。

圖 3 為本計畫砂岩及頁岩間試體強度與泥漿浸泡時間關係之示意圖，藍色五角形代表井下砂岩岩心栓抗壓強度與泥漿浸泡時間之關係，可經由井下岩心栓之泥漿浸泡實驗而得，其砂岩中含有少量頁岩部分會受到泥漿浸泡而膨脹或分解，造成抗壓強度降低，本計畫預期岩心栓抗壓強度與泥漿浸泡時間關係為隨浸泡時間越久，抗壓強度則越低。泥漿浸泡過程中的水分逐漸滲入岩心栓之間，加上還原地層溫度及差壓，造成岩心栓中膠結強度逐漸減低，含水量逐漸增加使得岩心栓受到壓力影響越發明顯，預期抗壓強度會逐漸下降；紅色五角形為人造岩砂岩岩心栓抗壓強度與泥漿浸泡時間之關係，可經由砂岩鑽屑製成之人造岩而得，本計畫規劃使用與井下岩心栓同井及測深之鑽屑；紅色三角形為人造岩頁岩岩心栓抗壓強度與泥漿浸泡時間之關係，本計畫規劃使用同地層之頁岩鑽屑，並取得相對高壓(生產初期)及低壓(耗竭氣層)之地層鑽屑，確認地層應力強度隨地層壓力降低而降低(Rida, 2021)的現象是否存在於人造岩試體；藍色三角形為預設井下頁岩岩心栓抗壓強度與泥漿浸泡時間之關係，藉以在難以取得完整頁岩岩心栓條件下，推估出其應力變化情況。

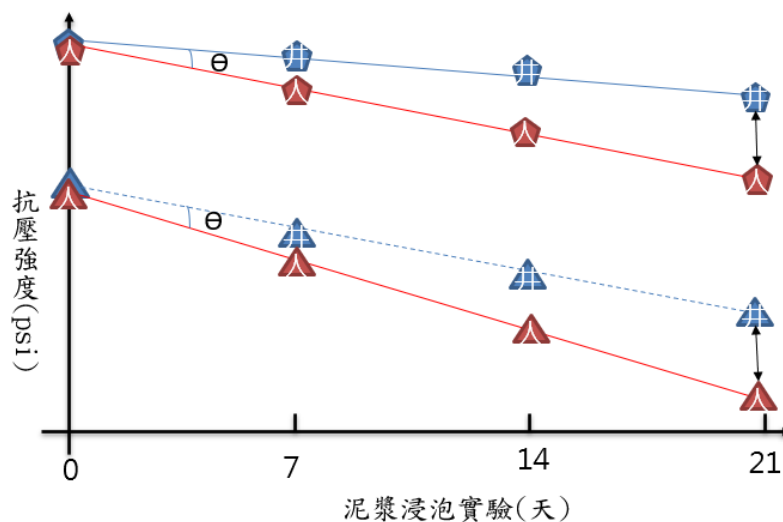


圖 3、岩心栓抗壓強度與泥漿浸泡實驗設計(藍色五角形代表井下砂岩岩心栓抗壓強度關係，藍色三角形代表預設井下頁岩岩心栓抗壓強度關係，紅色五角形代表人造岩砂岩岩心栓抗壓強度關係，紅色三角形代表人造岩頁岩岩心栓抗壓強度關係)

(三)、適用敏感性地層之鑽井泥漿配方研究

圖 4 為本計畫評比新泥漿配方流程，針對油氣井與地熱井卡阻高頻率出現的類型，依序進行量測流變性質、攜固粒能力試驗及溶散試驗，其中評估流變性

質為分別在高比重與低比重條件下流變性質的表現，以及藉由泥漿熱滾試驗評估泥漿耐溫程度；攜固粒能力試驗為使用現地鑽屑，依固定重量比例添加，分析其流變性質之相對應影響的程度，藉以評估能攜帶鑽屑量；溶散試驗為測試泥漿對鑽屑塊體的破壞程度，本計畫亦採用敏感性地層之鑽屑試驗，提高適用性。

本計畫評比之泥漿預期能優化既有泥漿，於耐溫程度、抑制頁岩及排屑能力等方面上，對於泥漿浸泡時間造成之綜合性地層損傷，亦能有所助益。

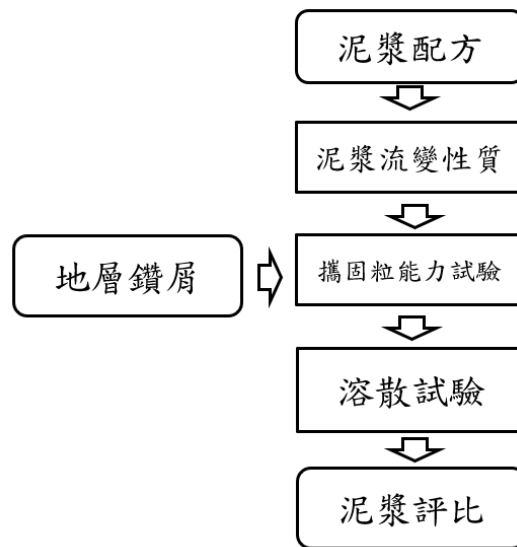


圖 4、本計畫泥漿配方評比流程

三、研究成果

(一)、敏感性地層篩選與分析

敏感性地層以油氣井與地熱井進行區分，將卡阻與工程狀況異常相關性分析分別以圖 5 及圖 6 呈現，油氣井生產層包含東坑層、打鹿頁岩、碧靈頁岩及木山層，其卡阻發生風險與泥漿浸泡時間、頁岩比例及地層等因素成正比，且地層壓力隨油氣生產而下降，進一步造成泥漿比重窗口左移而窄化，甚至有發生漏泥的風險，因此需要搭配敏感性地層岩體強度分析，進行地層強度評估，調整套管設計或是避開地層壓力因既有生產井而下降的區域。對於目前主要油氣鑽探目標之木山層，隨地層深度增加，泥漿受熱而造成泥漿排屑能力劣化的現象逐漸顯現，常見特徵為泥漿膠化，推測為泥漿中高分子成分變質，建議選用耐高溫、脫液水準佳、排屑能力佳之泥漿(圖 5)。

地熱井面對敏感性地層為廬山層、安山岩與五指山層。卡阻發生風險與泥漿浸泡時間與急彎有關，泥漿性能劣化情形與深部油氣井相似，泥漿排屑能力受到地層溫度而劣化，再加上容易發生地層滲透甚至漏泥等現象，可封堵地層微裂隙的泥漿成分更顯重要，如碳酸鈣與磺化瀝青等成分，其泥漿配方建議選用耐高溫、具封堵能力及排屑能力佳之泥漿(圖 6)。

油氣井

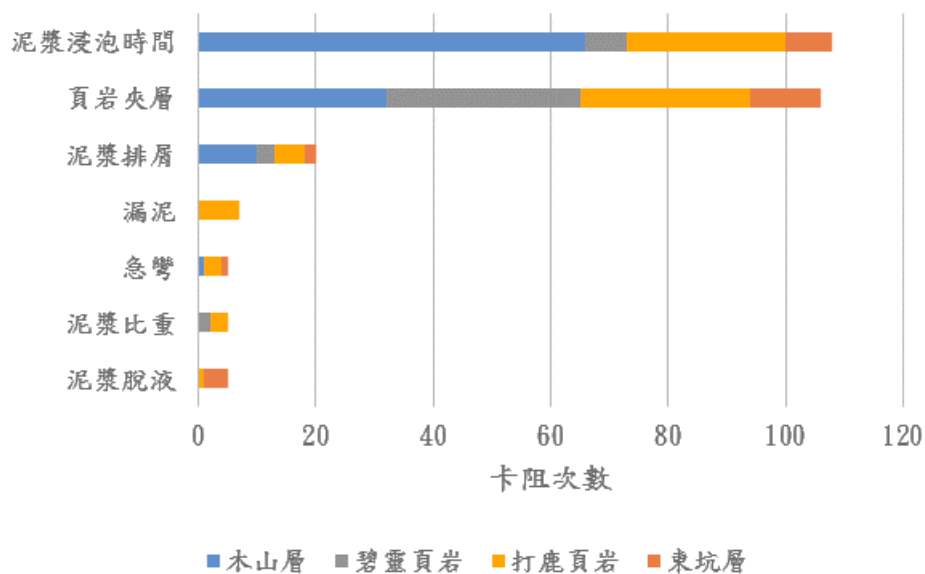


圖 5、油氣井卡阻與工程狀況異常相關性

地熱井

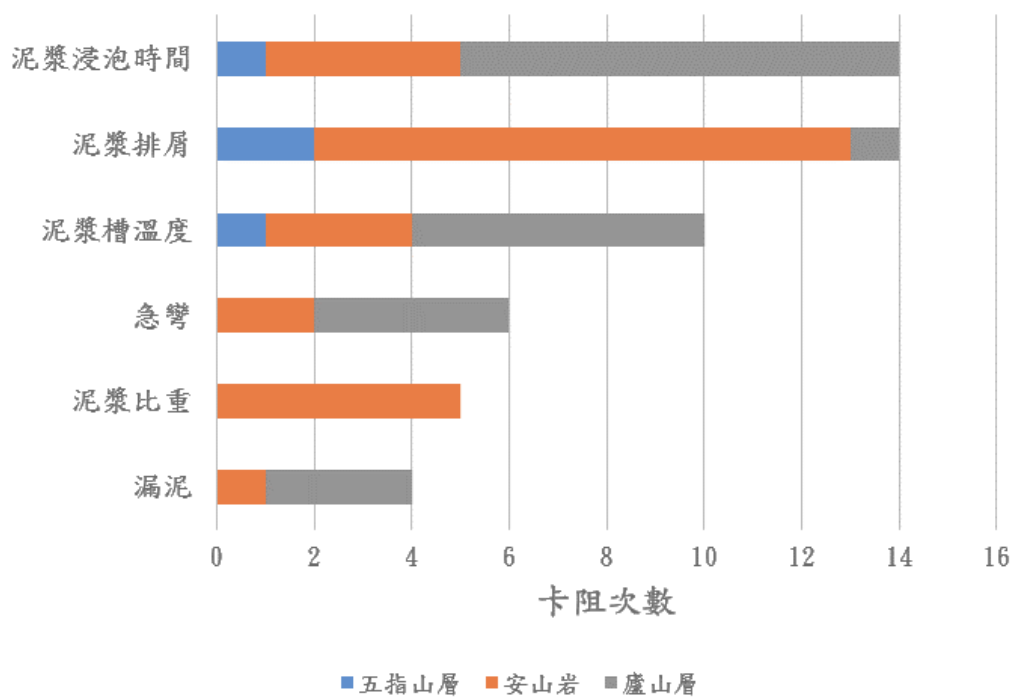


圖 6、地熱井卡阻與工程狀況異常相關性

(二)、敏感性地層岩體強度分析

本計畫委託國立成功大學進行敏感性地層試體之強度分析，強度分析包含超音波檢測、岩心巴西試驗及岩心三軸抗壓強度試驗等項目，進行 5 種試體的分析，包含打鹿頁岩井下岩芯、打鹿頁岩露頭及三種打鹿頁岩鑽屑製成之人造岩，根據試體砂頁岩比例，其中井下岩芯、露頭及人造岩 A 均屬高比例砂岩，而人造岩 B 及人造岩 C 均屬高比例頁岩，其高比例砂岩試體特性與高比例頁岩試體特性應彼此接近，以此標準檢視及分析結果證實，以單軸抗壓強度符合前述條件，因此以單軸抗壓數據進行後續分析(圖 7)。

圖 7 為井下岩芯 A、人造岩 A 及人造岩 C 之初始抗壓強度調整為 0 及各泥漿浸泡時間對應之抗壓強度點亦一併進行相同調整，藉以得出井下岩芯 C 斜率值，調整方式為使用夾角公式，以夾角公式求出兩斜率之夾角，由井下岩芯 A 與人造岩 A 之斜率(由 Excel 趨勢線得到)求出 $\tan\theta$ 值，再由利用人造岩 C 斜率(由 Excel 趨勢線得到)及 $\tan\theta$ 值反推出井下岩芯 C 之斜率(表 2)。

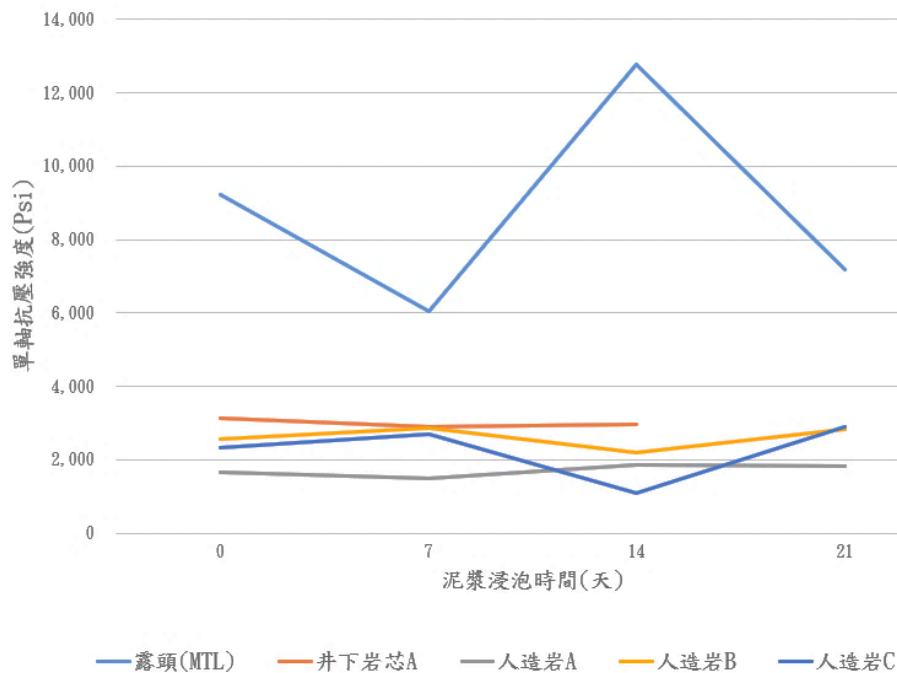


圖 7、試體單軸抗壓強度與泥漿浸泡時間的關係

表 2、預測錦水 84 號井下岩芯強度遞降斜率

項目	斜率
井下岩芯 A	-73.9
人造岩 A	35.7
人造岩 C	-24.0
井下岩芯 C	-12.0

圖 8 為錦水 C 井卡阻風險與其鑽屑製成之人造岩單軸抗壓強度遞降之關係，平均抗壓強度每下降 1% 則卡阻風險增加 6.3%，依據鑽井資料對照卡阻始發生在鑽遇地層第 7 日，抗壓強度遞降 2.2%，而卡阻風險最大發生在鑽遇地層第 34 日，抗壓強度約下降 10.7%。後續可作為預測卡阻風險之參考。

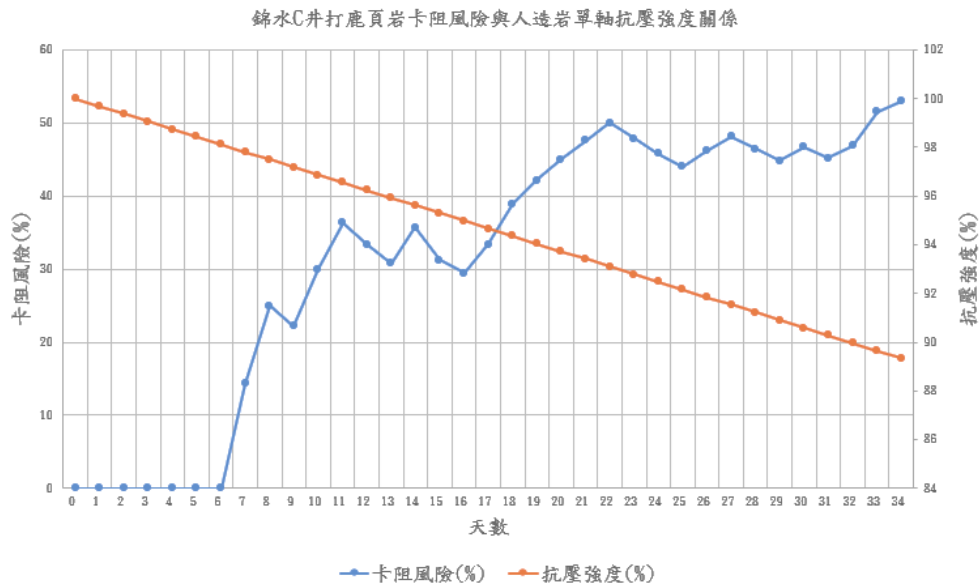


圖 8、錦水 C 井打鹿頁岩卡阻風險與單軸抗壓強度關係

(三)、適用敏感性地層之鑽井泥漿配方研究

本計畫以新高分子聚合物泥漿與既有泥漿配方 PHPA 系統，進行比較，並依序以泥漿流變實驗(表 3)及頁岩溶散試驗(表 4)，檢驗新泥漿配方與既有泥漿配方進行比較。結果顯示配方 F 以攝氏 150 度熱滾 16 小時後之高溫脫液水準及高溫排屑能力較既有配方佳，其餘排屑能力及頁岩溶散試驗亦有不錯水準。

表 3、PHPA 與配方 F 泥漿流變性質比較

項目	配方	PHPA	PHPA	F	F	F	
No.	測試項目	BHR(未加熱) /AHR(已加熱)	BHR	AHR	BHR	BHR	AHR
1	比重	g/ml	1.03	1.03	1.08	1.82	1.82
2	塑性黏度 (PV)	mPa · S	14	1	33	81	88
3	視黏度 (AV)	g/ m · S	19	3	46	115	110
4	屈服值 (YP)	Pa	5	2	13	34	22
5	高溫高壓脫液 (HTHPFL)	ml/150°C		過大			8.1
6	常溫脫液(FL)	ml			6.3	2.8	
7	動塑比 (YP/PV)(建議範圍：0.36~0.48)	n/a	0.32	1.50	0.38	0.41	0.24
8	流性指數(N)(建議範圍：0.4~0.7)	n/a	0.69	0.32	0.65	0.63	0.74
9	稠度係數(K)	n/a	0.16	0.27	0.51	1.49	0.66
10	排屑能力評價		能接受	無法使用	佳	佳	

表 4、打鹿頁岩溶散試驗

泥漿別	PHPA (C)	配方-F	清水
打鹿頁岩塊(公克)	9.97	9.93	9.68
過篩篩上重(公克)	8.79	9.84	1.38
回收率(%)	88.2	99.1	14.3

四、結論與建議

深層油氣井同時具有油氣井之頁岩夾層與地層壓力久經生產而降低的問題，另具有地熱井地層溫度過高的問題，本計畫藉由鑽井資料篩選出造成卡阻風險之成因，而將占比較高的項目，如泥漿浸泡時間、頁岩夾層及泥漿性質劣化等，以子計畫研究及委託試驗，完成鑽井泥漿浸泡對於井壁強度造成之影響趨勢預測，引進人造岩技術並搭配委託試驗結果驗證技術可行性，結合鑽井資料完成卡阻風險與抗壓強度的關係，依據委託試驗成果，證實以單軸抗壓強度，井下岩芯與其鑽屑製成之人造岩，經泥漿浸泡實驗，具有相似的強度遞降趨勢，藉由頁岩鑽屑之人造岩，反推出敏感性地層之強度遞降趨勢，並搭配鑽井資料，完成敏感性地層之井壁穩定時間預測；引進高分子聚合物泥漿配方並與現行泥漿配方進行比較，經泥漿配方評比流程已選出新配方，對於耐高溫、脫液及搭配敏感性地層鑽屑，確認頁岩保護力及排屑能力較既有泥漿佳，可做為深部油氣層及耗竭型氣層鑽井泥漿之選擇。

五、參考文獻

- 王乙翕，2000，“層狀岩盤之承載力”，中央大學土木工程學系碩士論文。
- 卿建業，1995，“人工軟弱岩石乘載行為研究”，交通大學土木工程學系碩士論文。
- 魏明輝，1993，“聚合物泥漿之應用研究(二)”中國石油股份有限公司台灣探勘總處，第 13 頁。
- 鍾峻偉，2001，“人造軟砂岩之研製與性質”，交通大學土木工程學系碩士論文。
- Can M., 2017, “A Synthetic Material to Simulate Soft Rocks and Its Applications for Model Studies of Socketed Piles” *Advances in Materials Science and Engineering* Volume 2017, Article ID 1565438, 8 pages
- Gu, D. Z., Jafari, M. R. and Mostyn, G., 1993, “An artificial soft rock for physical modelling”, *Proceedings of Geotechnical Engineering of Hard Soil-Soft Rocks*, Anagnostopoulos et al. (end), Balkema, Rotterdam, pp.517-524.
- Johnston, I., Choi S., 1986, “A synthetic soft rock for laboratory model studies”, *Géotechnique* Vol.36 Issue 2, pp.251-263.
- Nong, X.and Towhata, I., 2017, “Investigation of mechanical properties of soft rock

due to laboratory reproduction of physical weathering process” ScienceDirect Soils and Foundations Vol.57, pp.267–276.

Rida M.E.and Victor S., 2021, “The Essence of Horizontal Drilling Challenges in Depleted Reservoirs” Paper presented at the SPE Western Regional Meeting, Virtual, April 2021.

Qi Z., and Zhaohui W., 2019, “Stuck Pipe Incidents Prediction Based On Data Analysis”, This paper was prepared for presentation at the SPE Gas & Oil Technology Showcase and Conference held in Dubai, UAE, 21 - 23 October 2019.

Tien, Y.-M., and Tsao, P.-F., 2000, “Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.37, pp.1001-1012.