

地下管線陰極防蝕工程應用與檢測

邱德俊

台灣中油股份有限公司煉製研究所

一、前言

陰極防蝕是以電化學的原理利用工程應用的方式對大範圍的地下金屬結構物進行防蝕措施，它可以對地下或海下的金屬結構物提供防蝕電流使金屬結構物即使在沒有包覆的情況下達到防蝕的目的；地下管線使用有機性的絕緣包覆帶來阻隔金屬管線和土壤環境的腐蝕因子。包覆帶雖有防蝕功能但是管線上的包覆並無法達到百分之百的隔離，而且這些有機包覆有時卻是土壤中硫酸還原菌(sulfate reducing bacteria)相當營養的食物，這些細菌可以分解包覆，破壞包覆產生的產物更加速地下管線鋼材的腐蝕[1]；土壤環境中的氯離子(chloride)、硫酸根離子(sulfate)也會加速管線的腐蝕。採用陰極防蝕則是可以有效克服包覆所無法達到的防蝕功能，同時陰極防蝕更可以提供地下管線任何位置長時間的防蝕達到確保地下管線的營運安全及增加其操作壽命的目的。

因此若能在建造時即針對陰極防蝕的設備及工法作充分的瞭解，妥善規劃施工程序可以減少複雜與大範圍的陰極防蝕系統產生缺陷，使地下管線的防蝕功能完整發揮。

本文的主要目的在討論地下管線陰極防蝕工程的各項施工法的特性及適用範圍，提供使用者瞭解並注意如何正確將其應用在陰極防蝕的系統，並說明在陰極防蝕系統下如何對防蝕系統及地下管線系統進行應有的基本維護及檢測工作，以做好地下管線的陰極防蝕保護。

2.1 陰極防蝕的工程應用

地下管線陰極防蝕所用的型式可分別犧牲陽極及外加電流陽極兩種系統見圖一及圖二。

2.1.1 犧牲陽極

土壤環境中使用鎂合金作為陽極，見圖三。利用鎂和鋼管的電位差為驅動電壓提供防蝕電流，此時正負極的有效電壓差僅 0.7V 至 1.1V，比市售的家用 1.5V 電池小，因此正負極之間即始增加 1 的電阻都會使電流減少 5% ~ 10% (在 3000 - cm 土壤中) 的電流，因此鎂合金陽極地床和陽極的施工均需以不增加阻抗為主要考量[2]。

鎂合金陽極在安裝前應進行現場電位的檢驗工作，執行方式如下：

- (1) 將鎂合金陽極外包的紙袋或塑膠袋取下(安裝時亦同)。
- (2) 將鎂合金陽極浸泡在裝滿水的大型塑膠桶內浸泡一至二小時，浸泡時導線末端勿放入水中。
- (3) 以硫酸銅參考電極量測時鎂陽極的開路電位應在 -1.45V (標準型) 或 -1.70V (高電位型) 以上。

安裝時鎂陽極埋設的位置 (地床) 應以溪砂回填，地床必須在開挖區的最低位置，儘量使地床保持在濕潤的狀態。陽極距離管線的距離以 1~1.5 公尺時對管線的防蝕有最佳效果，太近時防蝕保護的範圍過度集中會使其他位置缺乏防蝕保護。在工程實務上不太可能將鎂合金陽極埋設距離管線 1~1.5 公尺外，雖然無法維持最佳距離，兩者的距離至少應有 60 公分。設計者會依實務及管線埋設條件增加陽極的數量。陽極數量的增加是因為要克服陽極和管線距離縮小，後部份無法獲得電流的區域。陽極導線連到地下管線上可以使用併聯的方式來安裝，而安裝的方式如下圖四。

圖四(a) 的方式可讓陽極的效果發揮到最大，但須作導線和管線的多次焊接及包覆，成本增加。(c) 的方式無法將電流分散並傳遞到管線，而且導線連接的位置完全無法做到防水要求，(b) 的方式是目前使用最多型式，但每個陽極導線接到導線時一定要用三通熱熔焊接 (Thermit Welding) 的方式增加焊接點的強度和導電性，焊接位置被覆的部份也必須使用三通被覆 (Splice Kit) 來包覆確實，阻絕水份的浸入。若焊接位置被覆失效或水份入浸，在土壤中的銅線將在半年內腐蝕，使犧牲陽極系統失效。

某些設計會將陽極或陽極組導線和管線的排流導線引至接線箱內形

成回路，這種施工方式，陽極和管線導線的防水處理必須特別注意，最好是將接線箱設置為地上型，則可避免導線腐蝕。

無論採用何種埋設方式，陽極導線線徑最好使用 # 8 AWG 以上且長度不長於 3 公尺若採用 (b) 的接線方式，則主線的線徑應大於 # 8 AWG，主因仍為減少導線阻抗。

2.1.2 外加電流陽極地床

地下管線的外加電流系統陽極常使用淺井式陽極地床和深井式陽極地床兩種型式，淺井式陽極地床的使用越來越少，主因是淺井陽極床的用地需極大，約需要至少 40 公尺長的區域設置陽極，另一原因是淺井陽極地床會產生干擾。兩種地床的優缺點見下表；地床型式示意圖見圖五及圖六。

	優點	缺點
淺井地床	成本低、易施工 適用任何陽極	易產生干擾、用地範圍大 陽極使用數量多 易被外界破壞
深井地床	用地範圍小、陽極數量少 陽極阻抗低	成本較高 陽極以輕質陽極較適合 施工複雜

表一 淺井地床與深井地床比較

2.1.3 淺井陽極地床的施工

淺井陽極埋設的深度為地下三至五公尺左右，淺井地床所使用的陽極大部份是高矽鑄鐵陽極，使用此種陽極時要特別注意導線和陽極接線方式，見圖五。施工的方式是應用鑽井方式鑿挖五吋至八吋直徑的淺井。井的底部應先回填二十公分厚的碳質回填料後再將陽極放入井中，井壁和陽極的空隙應以碳質回填料緊密充填並高於陽極頂部三十公分，剩下

的空間則以溪砂及原土回填。通常為了方便施工，會用挖土機以鏟挖之方式挖掘出一個大洞再把陽極置入。這是相當不正確的方式，此種方式無法將碳質回填料均勻且緊密地包圍在陽極周圍，而且在機械夯實的過程會使陽極或導線失效，應盡量避免採用。淺井陽極之間會產生電壓的干擾，使得每一支陽極的輸出電流下降，因此陽極間的距離不得任意縮小，一般而言距離會受陽極的電流大小、陽極的數量有關。淺井陽極床的陽極可用水平的方式埋設，其深度應在地下兩公尺以下，以挖土機鏟挖成溝狀後先回填二十公分厚的碳質回填料，再將水平陽極放入，再覆蓋二十公分厚緊密的碳質回填料。

外加電流陽極導線和導線的接續比犧牲陽極的接線和包覆更重要，每一個導線間的接續應使用壓接浸錫及三通熱熔焊後再以三通被覆以熱縮方式來處理，否則裸露的銅線會在極短的時間內斷裂或因接續點阻抗太大，產生熱使包覆失效。

2.1.4 深井地床的施工

深井地床是目前使用最頻繁的外加電流陽極地床型式。深井地床井以可使用衝擊式、螺旋式或高壓氣體等鑽井方式，無論採用何種方式都不能使用非金屬管來作為井壁的支撐。有效陽極的部份應使用鋼套管，鋼管和鋼管之間應完全焊接，底部也應盲封。地床井中非有效陽極的部份應使用 PVC 管或 PE 管。當井內的套管安裝完成後，可將陽極依設計的數量、間隔將陽極降到有效陽極區段，陽極導線應固定於井的頂部，陽極應儘量保持在管的中心。通氣管的安裝相當重要，由於陽極在陰極防蝕運作時會產生氧氣、氯氣及熱量。陽極每安培小時可產生 1.83 立方公尺的氧氣，在高電位下更會產生氯氣。為了排除這些氣體，陽極井中一定要安裝多孔性的非金屬管，使產生的氣體可以排出。通氣管的排放口不可放置在人手孔內，一定要引至大氣中。

深井地床的有效陽極段要充填碳質回填料，碳質回填料可和陽極緊密接觸降低陽極界面阻抗，使得陽極的消耗速率降低。碳質回填的安裝最佳方式是將碳砂攪拌在水槽中以 $5 \sim 6 \text{ kg / c m}^2$ 的壓力打入井中。在工程實務會將乾燥的碳砂以傾倒的方式倒入井內，這一步驟很容易造成地床井

失敗。若要採用此種方式建議可以將碳質回填料以每五分鐘加入五十公斤的碳質回填料的速率倒入，使碳質回填料可以順利沉降至底部，每日倒入的數量不得超過一千公斤，之後靜置二十四小時再重覆進行，一個地床井將需 4~6 天才能完成碳質回填料的回填，主要目的是使碳質回填料可以完全沉降並緊實。若將四、五千公斤的回填砂快速地傾倒入井內，將可能會阻塞在套管中段，使陽極缺乏碳質回填料而浸泡在水中加速消耗。碳砂的另一目的是散熱，當陽極放電時整個地床的溫度會上昇[3]，上昇的溫度會使陽極導線被覆失效或使陽極消耗速率增加。

淺井陽極由於產生表面的電壓差大，易引起干擾及保護過於集中的問題，因此淺井陽極的距離至少要離地下管線 100 公尺，同時也要遠離未保護的管線或外界管線以避免造成外界管線腐蝕。

2.1.5 整流器安裝

整流器可以安裝在地面或電桿上，安裝在地面之整流器可以容易進行維修及檢查，但應設置圍籬保護以避免使他人遭受電擊，在許多地方整流器無法或不允許安裝在地面時可將整流器安裝在電桿上。電桿必須是 7.5 公尺長的電桿，設置完成後電桿在地面長度為 5.5 公尺，由於電桿上將設置整流器及檢查台，因此電桿的穩定性相當重要。電桿埋設時基礎應安裝與電桿垂直方向之水平腳架，並以石塊回填至少八十公分再回填原土後，以 60 x60 x60 公分鋼筋混凝土固定。檢查台架護欄高度要高於 1.1 公尺以避免人員墜落，整流器應有獨立之基礎支撐架並可以固定在電桿上。檢查台架不得負荷整流器之重量。在風勢大的迎風區為確保其穩定性，可以用雙桿之方式安裝整流器見圖八，此時整流器將可以安裝在檢查台架。

安裝整流器時電源的輸入端必須安裝電磁開關及漏電斷路器，不可直接將交流電源引入整流器之電磁開關內。整流器安裝時應注意交流電源及其他電力線避免電擊。

2.1.6 導線焊接

由於陰極防蝕是靠陽極放出的電流來提供地下管線防蝕電流，因此

系統回路中阻抗的增加都會影響系統的效率和效果。在陰極防蝕中導線焊接到地下管線最佳的方式是利用熱熔焊(Thermit welding)方式將導線焊接到管線上見圖九，焊接時管線將包覆切割十公分見方或在管線與管線的焊道區域，管線表面必須清潔並以砂布或挫刀將焊接區域作簡單的砂磨工作增加粗糙度，焊接完成後應在焊接點由火紅色轉成暗紅色之際以鉗頭將焊區凸起敲成平滑並將焊渣清除，以避免破壞包覆。焊接完成後可以用徒手方式將導線抽拉以判斷導線焊接是否牢靠。在包覆時應先用熔融的柏油澆注在焊接的區域，可排除水分及執行包覆前的前處理，這個步驟可以增加包覆和原管線包覆的緊密性，也可在防蝕新舊包覆介面剝離時仍有阻斷水份之作用，當導線焊接在地下管線上並完成包覆後為了避免回填時將導線扯斷或自焊接處脫落，應將導線先纏繞在地下管線上並應套上 PVC 管保護。

2.1.7 鋅地電池的安裝埋設

鋅地電池在安裝時是以可以快速排除突波電流阻止法蘭兩端電壓差的產生[4,5]，但除了降低電池兩端的阻抗外，也要避免鋅地電池造成陰極防蝕失效；若有二條以上管線都需同時安裝電池組時不可將兩條管線的同側管安裝在同一電池組的一邊，因為這樣的安裝會使得防蝕電流可能無法依原設計將均勻分布在各管線上，鋅地電池見圖十。

三、地下管線陰極防蝕的檢測

成功的地下管線陰極防蝕除了設備材料及施工的完善外，維護管理更是確保地下管線可以長期使用的重要依據。有效地掌握防蝕系統是否正常運作及管線系統的檢測將可以降低操作成本，消除地下管線腐蝕防止地下管線洩漏。

在陰極防蝕正式啟動之前地下管線對地電位應先量測，在送電之後也應量測地下管線對地電位以判斷初始操作是否正常，在適當的極化後應進行防蝕評估以確定防蝕是否依準則正常運作，地下管線評估的種類可以採用下列項目，檢查的週期至少每年一次。

定期設備的檢測項目包含了下列項目：

- (1) 外加電流陰極防蝕的電流源至少每三個月檢查一次，檢測的項目為電流輸出、電力消耗，電氣是否有不正常的信號。
- (2) 所有受到外加電流陰極防蝕設備需每年檢查一次，以避免在使用中受到破損，檢測項目有是否短路、接地程度、計量表正確與否、電路電阻是否昇高等。
- (3) 絕緣設備、電氣連通器、絕緣效率，必須定期量測。

在檢測或維護的目標中仍然以地下管線的防蝕檢測最為重要。地下管線施行陰極防蝕後例是否達到原本的防蝕目地只能利用各種電位檢測及智慧型PIG檢測來判知防蝕狀態。上述兩種檢測法中以電位檢測較為經濟且可以自行執行的方法，這種方法雖有檢測缺陷上的限制，卻可以在防蝕檢測上得到相當不錯的定性結果。以電位檢測而言，由於地下管線接受到防蝕電流時管線會以極化後的電位來表現其目前的狀態。檢測人員則利用量測後電位的高低來研判管線是否腐蝕、包覆是否破壞及是否受到干擾。

陰極防蝕的保護準則是以鋼鐵在土壤或水中受到防蝕電流後可維持到鈍態範圍的電位，目前設定的保護電位值是以美國防蝕工程協會(NACE)於1969年所訂定的鋼鐵對飽和硫酸銅參考電極需達 -850 mV [6]。事實上此項標準並非絕對適用；因此防蝕工程師在設定防蝕電位時都會針對使用環境來決定是否需維持在更負的電位值，以確保抑制腐蝕行為的發生，近來也提出了(2)、(3)項電位偏移來做為保護的標準。目前常用的防蝕標準簡述如下：

- (1). 鋼鐵對飽和硫酸銅參考電極之電位需達 -850 mV 。
- (2). 在施行陰極防蝕控制時，結構物的電位須由原來的電位值向負方向移動 300 mV 以上。
- (3). 在施行陰極防蝕控制後，結構物的極化電位須向負方向移動 -100 mV 。

(2)、(3)兩項準則對防蝕效果判定上較為準確，但在實際檢測方法都較為困難，因此目前仍以使鋼鐵電位維持在 - 850 mV 以下的準則最為普遍。但此種方式僅能作為現場操作人員初步的研判，因為這種檢測結果缺乏全面性及無法看到管線的各點狀態，因此目前國內外的公司都已採用緊密極化電位量測來得更準確的電位值，來研判缺陷及防蝕狀態 [7][8]。

緊密極化電位是讀取管線在防蝕系統下通電與斷電時的電位，而電位的讀取是以數公尺的長度為量測距離單位讀取管線任一點的電位，精確程度高，在專業人員分析下可以找出管線包覆的缺陷及腐蝕程度。

在量測地下結構物時，參考電極究該放在什麼位置，仍令人相當困擾，由於土壤環境的差異造成各地區土壤的 IR Drop 都不相同，而一般的保護電位所讀出來的值都包含了所在位置和結構物間之 IR Drop 因此有些地方量測值為 -850 mV，卻仍發生腐蝕也就是量測的電位無法讓操作人員瞭解結構物上每點之狀態，這種 IR Drop 不同所造成的誤差，經常被忽略。IR Drop 包含在保護電位中，如下式所示

$$E = E_p + V_{IR} \dots\dots\dots(1)$$

E = 保護電位值

E_p = 管線上之極化電位(真實電位)

V_{IR} = 土壤中所產生的 IR Drop

E_p 為結構物接受到陰極防蝕電流的真正電位，即極化電位，而根據該式(1)若能消除 V_{IR} 或量出 V_{IR} ，可得到 $E = E_p$ 或 $E_p = E - V_{IR}$ 即電位計上出現的電位值等於極化電位或經由計算而可得 E_p 。求得極化電位的方式，一般在應用上雖有多種方式，但在工程應用上以斷電法最為可行及準確。

斷電法量測緊密極化電位是使用電流間斷器，串聯在陰極防蝕系統電路中，間斷器以固定頻率將防蝕電源開路及閉路，當電源切斷時防蝕電流為零。方程式(4)如下式演變

$$E = E_p + V_{IR} \dots\dots(4) \quad V_{IR} = I \times f(R) = 0$$

$$E = E_p \dots\dots\dots (5)$$

在以瞬間所獲得到以電位即為極化電位，實際之量測方式如圖十三說明。

斷電時瞬間電位的讀取需要以記錄器來讀取，斷電的時間間隔不可太長，一般在 0.5 秒內，否則會導致結構物的去極化作用，而產生所得到的電位為去極化後之電位。若有兩個以上整流站則使用同步斷電器來間斷電源，以避免干擾而讀取不正確的電位。

在工程實務緊密電位及極化電位是同時進行，其檢測時設備配置見圖十一。管線保護電位量測及緊密極化電位量測的設備及量測的方法分別如下說明。

(1) 管線保護電位量測法

A.設備

- (a) 高輸入阻抗電錶(電位計)
- (b) 飽和硫酸銅參考電極
- (c) 導線

B.量測程序

- (a) 將電錶調至電壓量測功能
- (b) 以導線連接參考電極
- (c) 將另一條導線連接地下結構物之測試端子，或露出地面之結構物，如閘。
- (d) 移動參考電極至所要量測結構物之正上方
- (f) 讀取電位值

(2) 緊密電位量測法

緊密電位量測的目的在判斷長途管線防蝕效果、管線陰極區及陽極

區甚至可以判斷包覆劣化之程度，緊密電位之量測距離。一般 3 至 5 公尺，量測時由於需沿管線測量長度經常長達一公里，因此導線以使用細銅線以減輕量測時導線之重量及擴充性，量測的方式如一般保護電位。

A.設備

- (a) 高輸入阻抗電錶(電位計)
- (b) 飽和硫酸銅參考電極
- (c) 導線長度一公里以上

B.量測程序

- (a) 由地下管線測試端子連接導線至電錶一端
- (b) 將參考電極連接之電錶另一端
- (c) 讀取管對地電位值
- (d) 延長導線，移動參考電極距上一測試點 3 公尺，讀取電位。
- (f) 根據所讀數據作電位對距離作圖，即可判斷地下管線各項防蝕狀態。

(3) 極化電位量測法

A. 設備

- (a) 輸入高阻抗電錶(電位計)
- (b) 電流間斷器
- (c) 記錄器
- (d) 飽和硫酸銅參考電極
- (e) 導線

B.量測程序

- (a) 將電流間斷器的 ON/OFF 分別設為 1.5 秒/0.5 秒或 1.6 秒/0.4 秒

- (b) 設定間斷器啟動時間
- (c) 將間斷器串聯至 DC 整流器之輸出端
- (d) 設定記錄器讀數值之時間需大於 2 秒 (1.5 秒 + 0.5 秒)
- (e) 將連接參考電極之導線接至記錄器之負端，連接地下結構物的導線接至電位記錄器之正端
- (f) 待間斷器啟動後按下參考電極之開關記錄電位值

緊密電位和極化電位的同時應用可以確立管線的每一位置的防蝕及包覆狀態提供了是否需開挖修覆的依據。圖十二及圖十三為緊密極化電位量測的量測結果及管線所對應的狀態。

四、結論

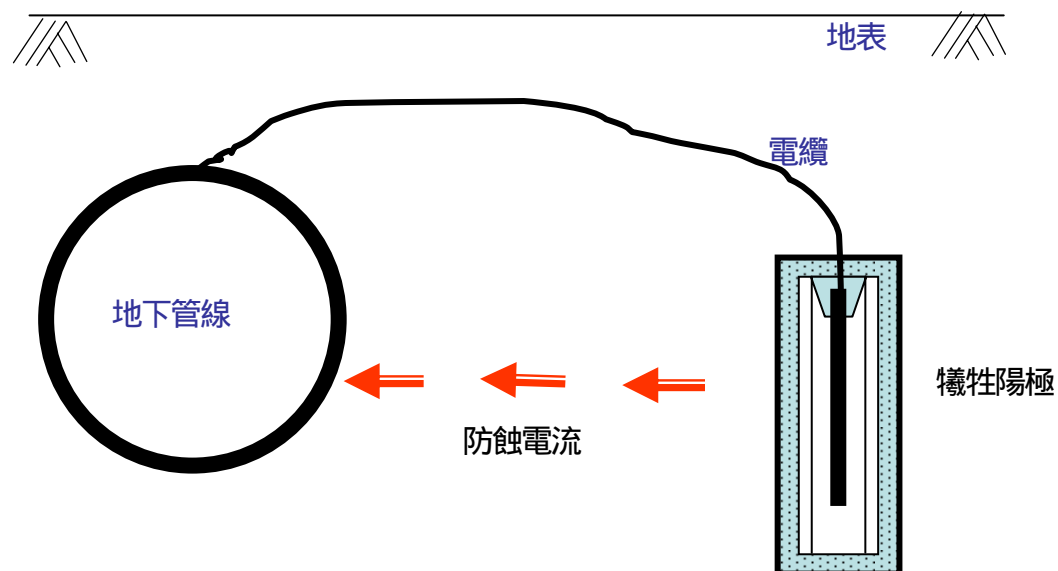
地下管線的陰極防蝕對企業來說是一種看不見回收的投資，因此在主客觀來說常常受到忽略，國內發多次油料及天然氣油漏事件後，大家才開始投入心力維持管線陰極防蝕系統，管線的腐蝕及漏洩卻依然發生，主因是雖然瞭解陰極防蝕的重要卻忽略在施工過程應專注的程序及標準，也使得後續操作和檢測的困難，這種施工過程中的疏忽，使得必須花上大量人力和財力去做改善、維護和檢測。陰極防蝕系統在管線操作期間的變動是非常小，因此良好的施工將是確保陰極防蝕成功的最重要步驟，而操作過程中定期而準確地進行檢測及維護工程絕對可以確保管線安全延長操作壽命，降低工安環保事件，更可有效降低事業單位之營運成本。

五、參考資料

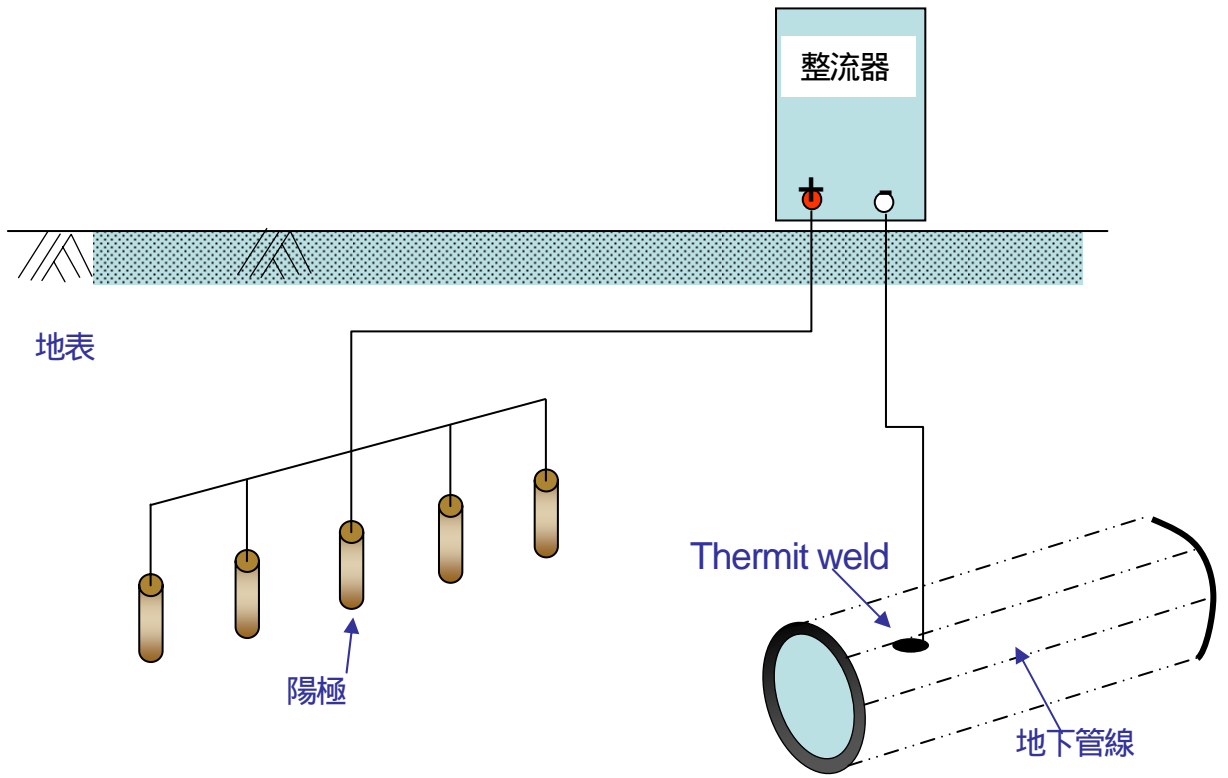
1. GD. Fauque, in Sulfate-Reducing Bacteria (ed., L.L. Barton), p. 217-241, Plenum Press, New York, NY (1995).
2. NACE Basic Corrosion Course, NACE, 1973, Houston, Texas.

3. W.V.Baeckmann, etc. Handbook of Cathodic Protection, 3rd. Gulf, Houston, Texas.
4. NACE Standard RP-286, The Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines, 1986
5. Zinc Anode Grounding Cell, Kbasco Service Incorporated.
6. NACE Standard RP-169-83, 1983
7. D. Slatter, M.C. Davidson, J.P. Grapiglia and W.T. Wong, Material Performance, Feb. 35 (1993).
8. Y.B. Cho, K.W. Park, K.S. Jeon, H.S. Song, D.S. Won, S.M. Lee and Y.T. Kho, in Proc. of the First Int. Pipeline Conf., Book No. H1048A, ASME, New York, NY

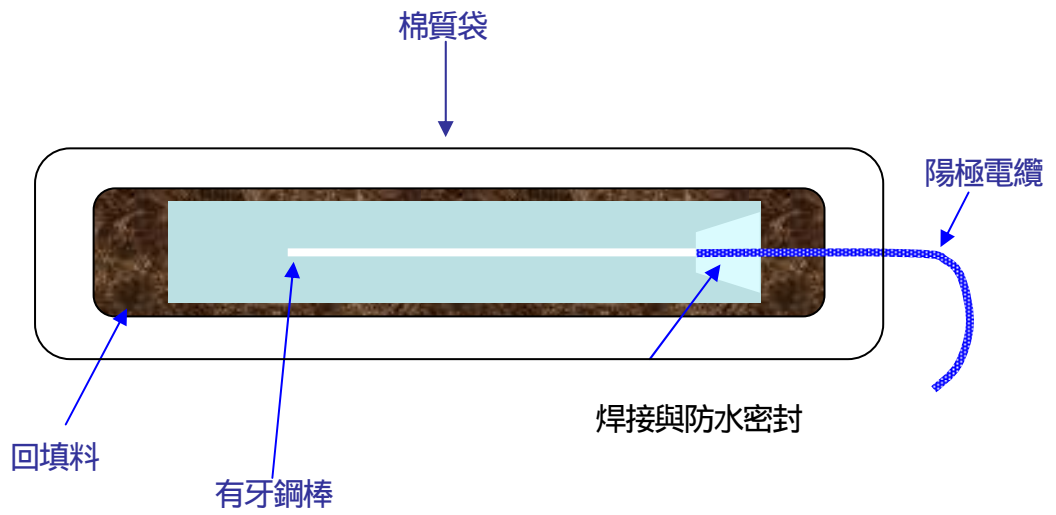
六、附圖



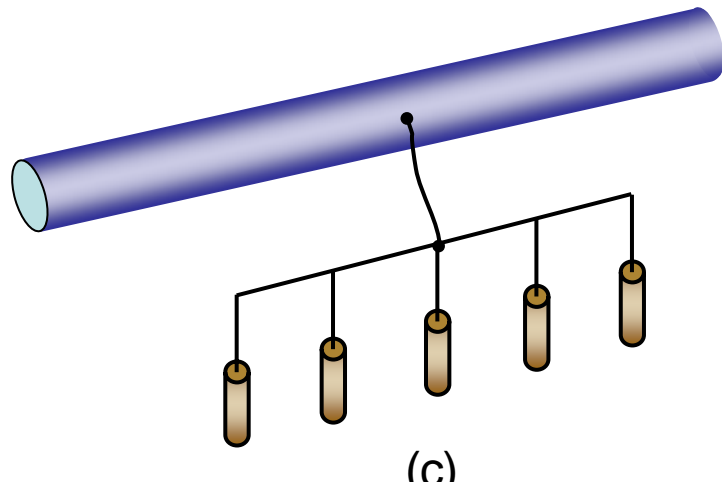
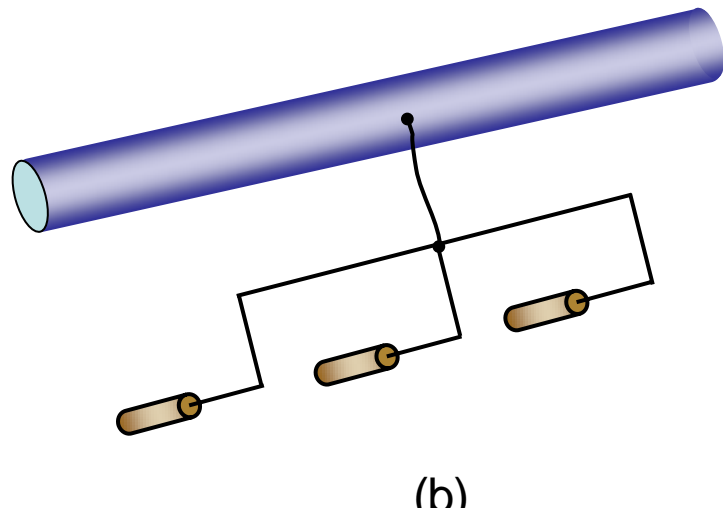
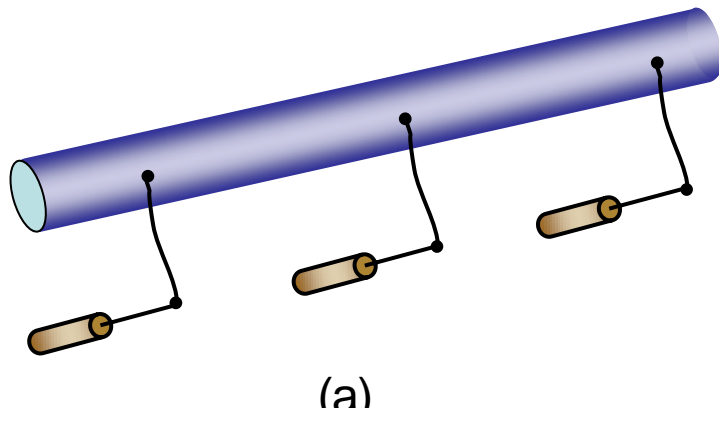
圖一 陰極防蝕犧牲陽極系統



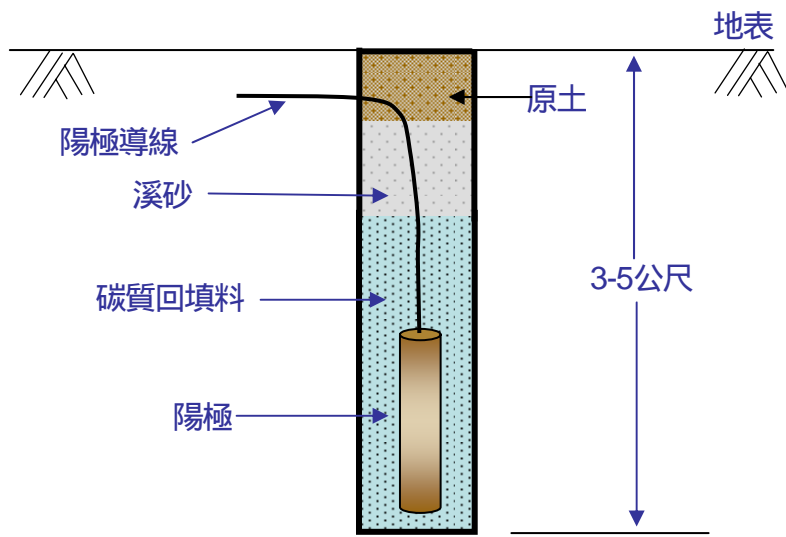
圖二 外加電流陰極防蝕系統



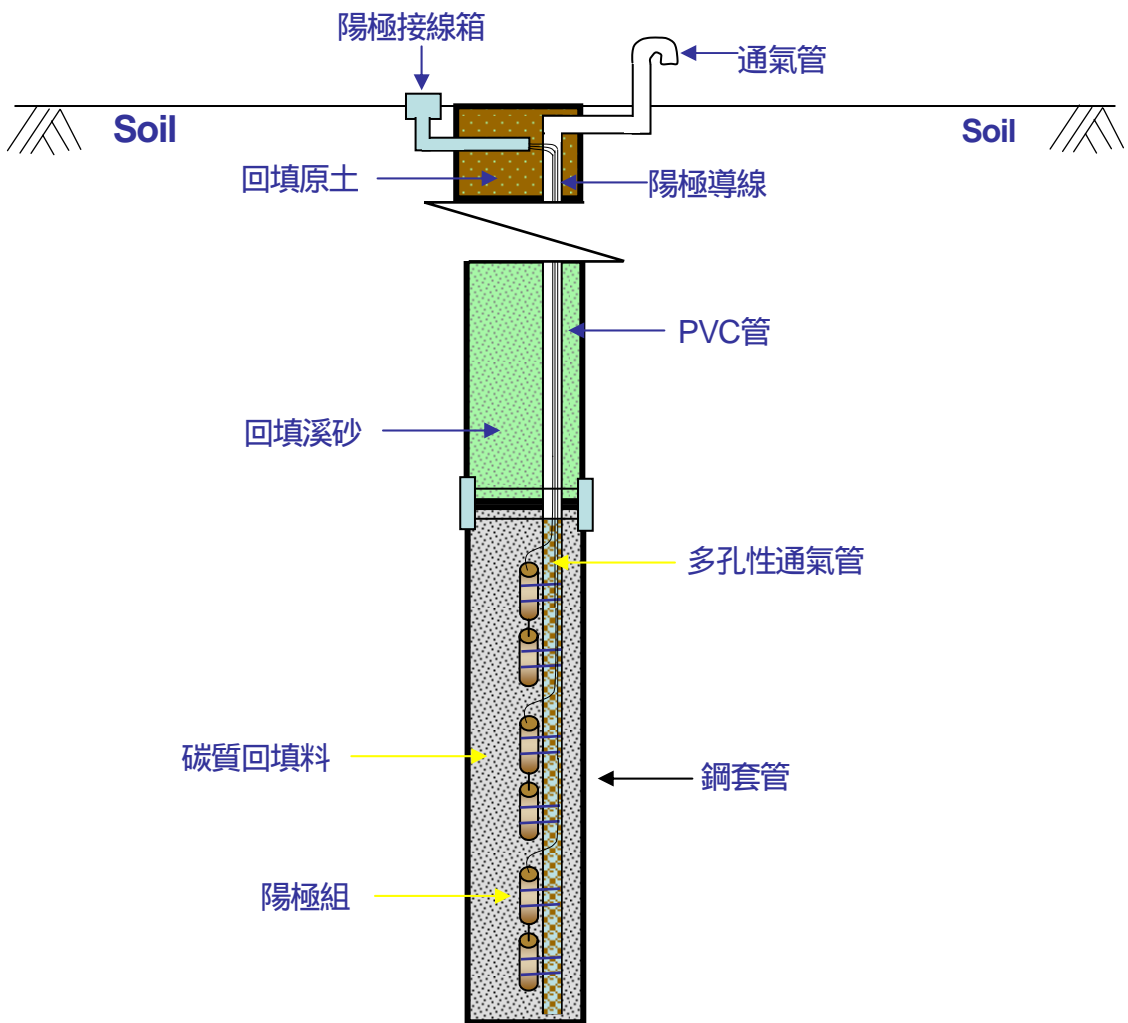
圖三 鎂合金陽極



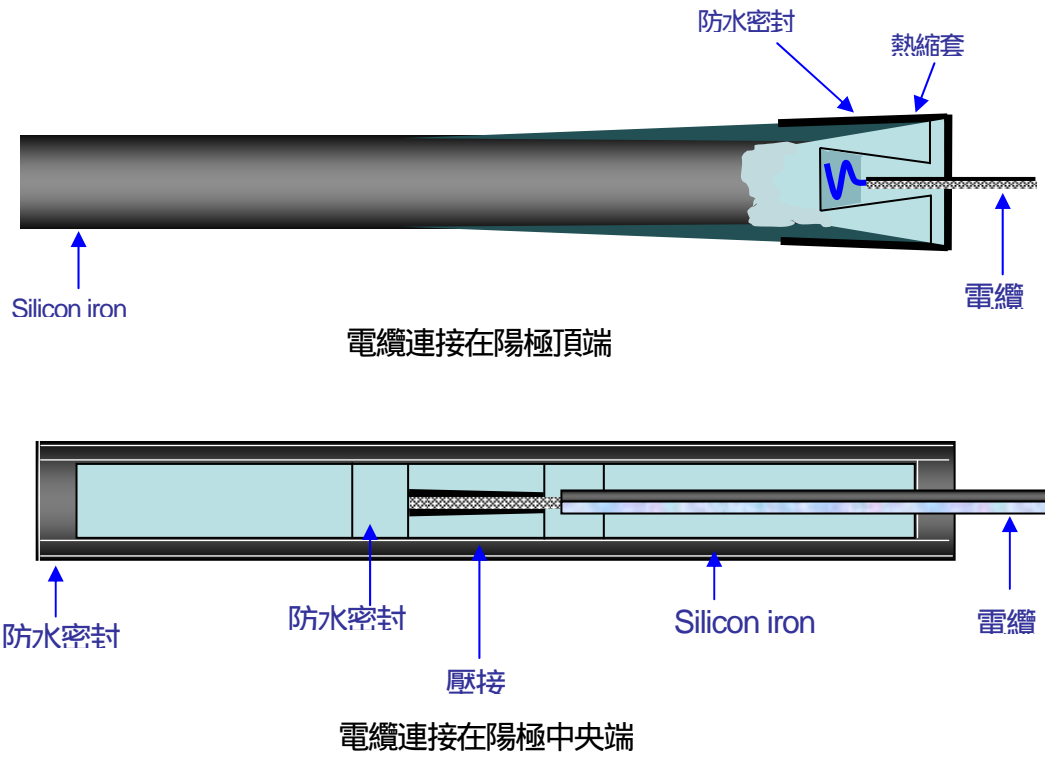
圖四 鎂合金陽極與地下管線接續方式



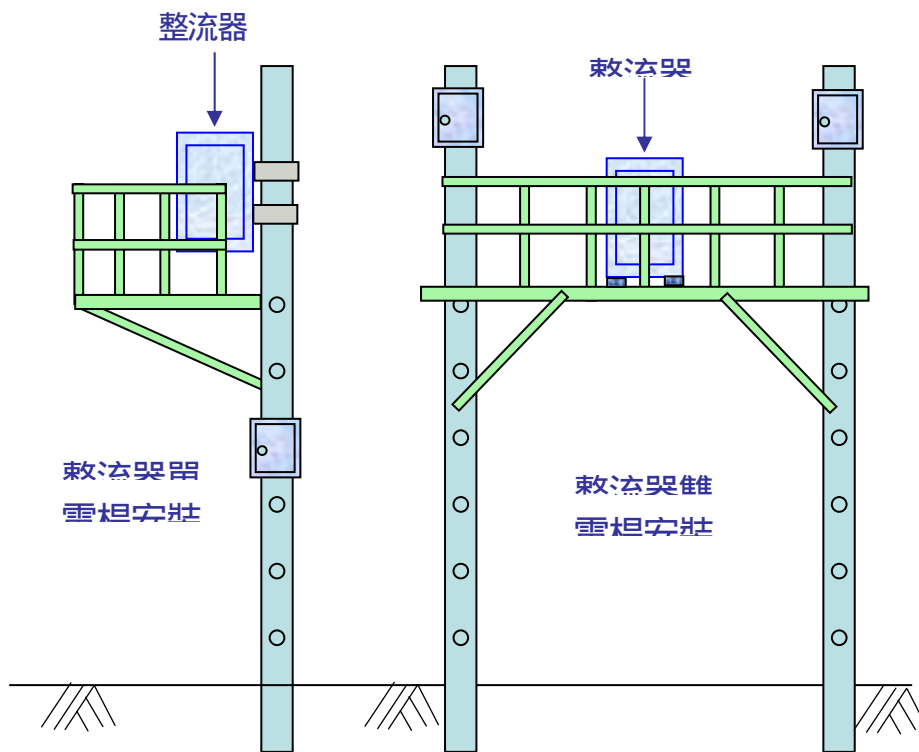
圖五 外加電流淺井地床



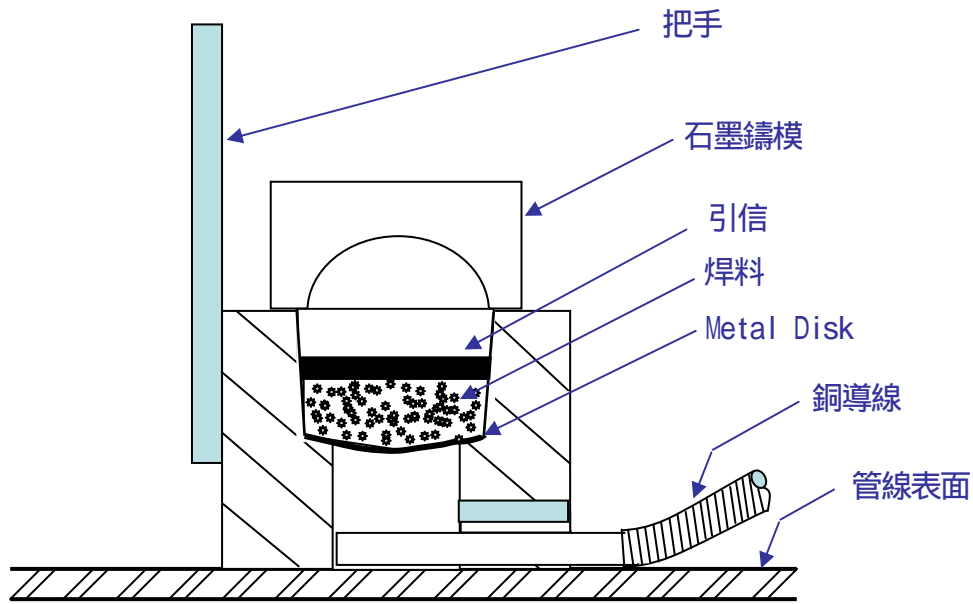
圖六 外加電流深井地床



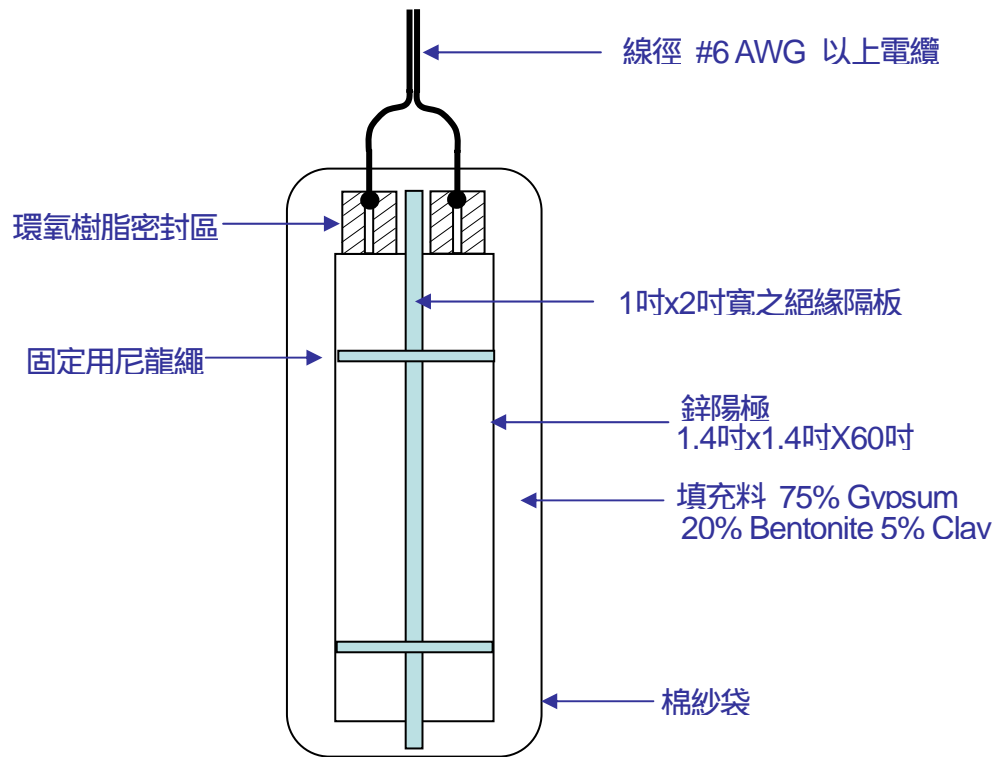
圖七 高矽鑄鐵陽極與電纜接續



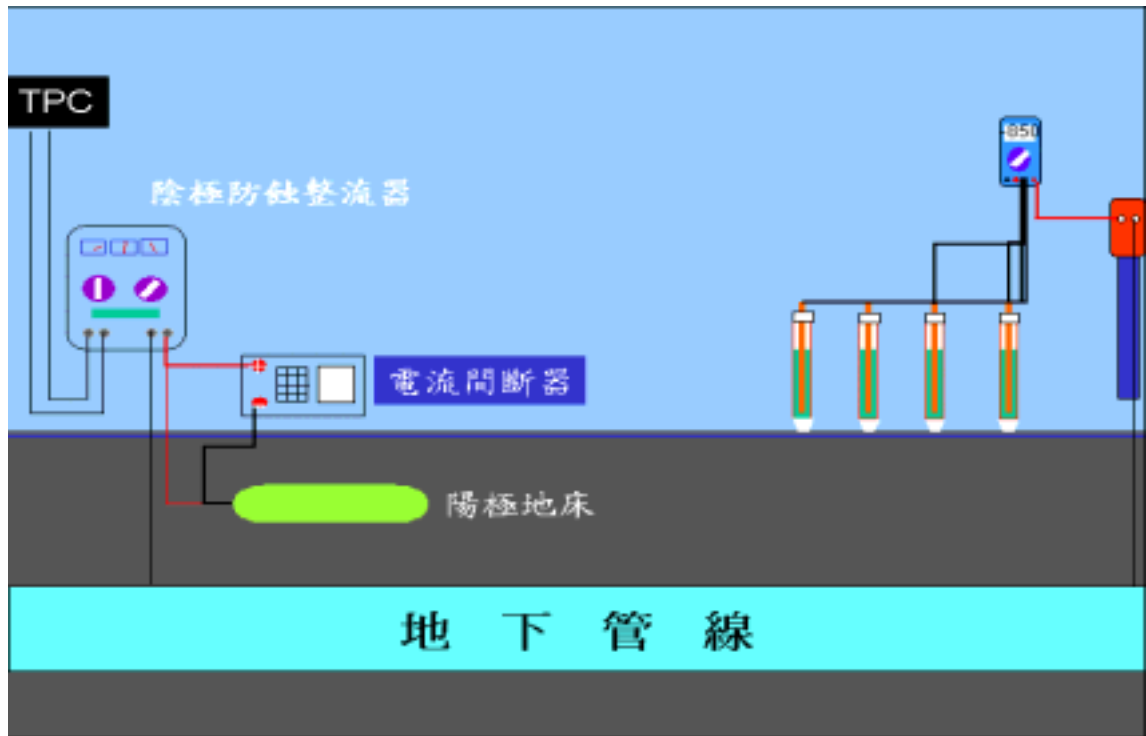
圖八 整流器電桿安裝



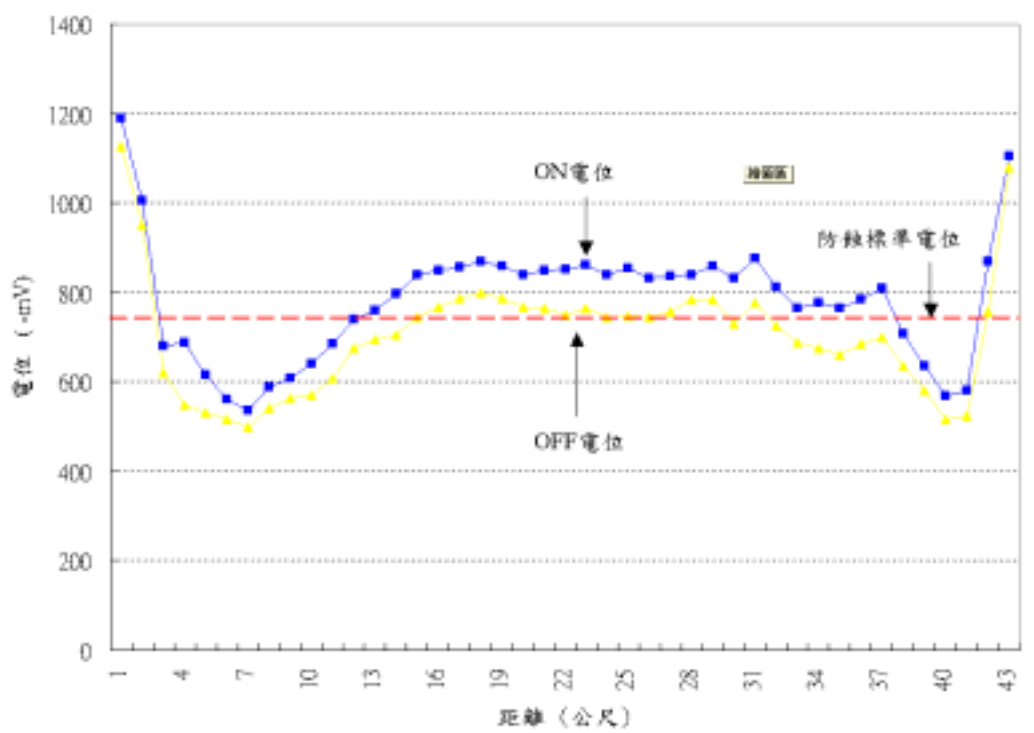
圖九 電纜焊接至鋼管表面



圖十 鋅地電池組



圖十一 緊密極化電位配置圖



圖十二 地下管線緊密極化電位曲線圖



圖十三 地下管線緊密極化電位曲線圖