

設備和管線包覆層下腐蝕問題之風險鑑別與預防

蘇俊吉

台灣中油股份有限公司

嘉義市民生南路 217 號

078271@cpc.com.tw

(Corrosion Under Insulation, CUI)問題是各類製程工場共同存在的問題，為設備和管線之隱形殺手，主要原因為包覆層下腐蝕問題被包覆材和金屬外罩所隱藏，肉眼不易被發現，且腐蝕型態呈現高度局部性，直到發現可見的徵兆，問題已很嚴重，常需發更多資源去處理，過去國內外陸續發生保溫層下腐蝕洩漏問題，造成工安問題以及非計畫性停爐等重大損失，本文首先以實際案例解析包覆層下腐蝕的成因以及影響因素，並歸納出設備和管線高風險的鑑別條件，包括溫度、環境條件以及設備結構因素等，以作為設備和管線清查、檢查和重點管理的依據，預防方案的研擬包括正確包覆材的設計/安裝，提高塗覆品質和充分應用多種檢查方法。

一、前言

工場設備和管線基於避免熱損失、製程穩定、人員保護、噪音控制、避免表面冷凝結冰和防火等考量必須進行包覆，包覆材種類包括保溫材、保冷材、混凝土或噴漿處理等，在 1970 年以後設備和管線陸續發現在保溫層下有腐蝕現象，1980 年以後破損案例更多，此即所謂包覆層下腐蝕(Corrosion Under Insulation 以下簡稱 CUI)，根據 NACE 報導以 1987 年統計資料保守估計工場因 CUI 所引起設備維修、汰換和停產損失約為美金 2500 萬元，同年一家化學公司之不鏽鋼塔槽因 CUI 問題，導致外部產生無數裂紋，無法鏟修而必須汰換，損失數百萬美元，2002 年英國 SHELL 公司發表的資料顯示 35%腐蝕意外事件來自 CUI 問題，該公司位於重工業區環境，非海洋環境，在損失方面統計顯示(A)60~80%管線維護費用來自 CUI、(B)NDE 和檢查費用接近重新塗漆費用和(C)修補 CUI 的費用占維修總預算 10%。

由國外研究報導和工業經驗可發現 CUI 問題是普遍存在的問題，可說是一項古老的問題，但相關新技術仍持續發展中，然而國內外一些公司至今仍問題叢生，主要原因為 CUI 問題被包覆材和金屬外罩層所隱藏，肉眼不易被發現，且腐蝕型態屬於高度局部性，直到發現可見的徵兆，問題已很嚴重，常需發更多資源去處理它，另一問題為包覆材的選用和設計是基於製程需求，主要由方法或設計工程師來主導，腐蝕問題常被忽略或當成次級考量因素，即使更換或維修包覆材也是基於能耗考量，而材料工程師過去重點也集中在製程側內容物對設備的腐蝕問題，沒有系統化整合去面對此問題，本文主要藉由對 CUI 的影響因速探討以及實際案例的分析，來鑑別工場潛在 CUI 風險的參數和位置，進而對老舊之設備設計、管理、維修以及檢查方法提出建議，由問題的認知進而了解處理模式，以確保工場操作安全和降低非計劃性停爐所引起之相關經濟損失。

二、實際案例說明

圖一為一座約 30 多公尺高的塔槽，使用約 20 多年後發生減薄洩漏實例，塔槽操作溫度約在 41~86°C 之間，腐蝕發生在 L 型支撐環附近上方殼板，由此照片外觀可發現殼板和支撐環焊接處上方附近全周腐蝕，腐蝕生成物呈現厚片層狀剝離，腐蝕生成物主要為三氧化二鐵和四氧化三鐵，因此研判腐蝕型態為局部性氧蝕所致，和一般大氣腐蝕劣化機制類似，經調查肇因為此處 L 型支撐環保溫安裝層疊錯誤，再加上 L 形包覆支撐環溶液積水，導致長期水滲入包覆層和殼壁間，不易散去，因而發生腐蝕現象，此外局部地方可發現腐蝕往上延伸，如圖一箭頭所示，因包覆材具吸水性，

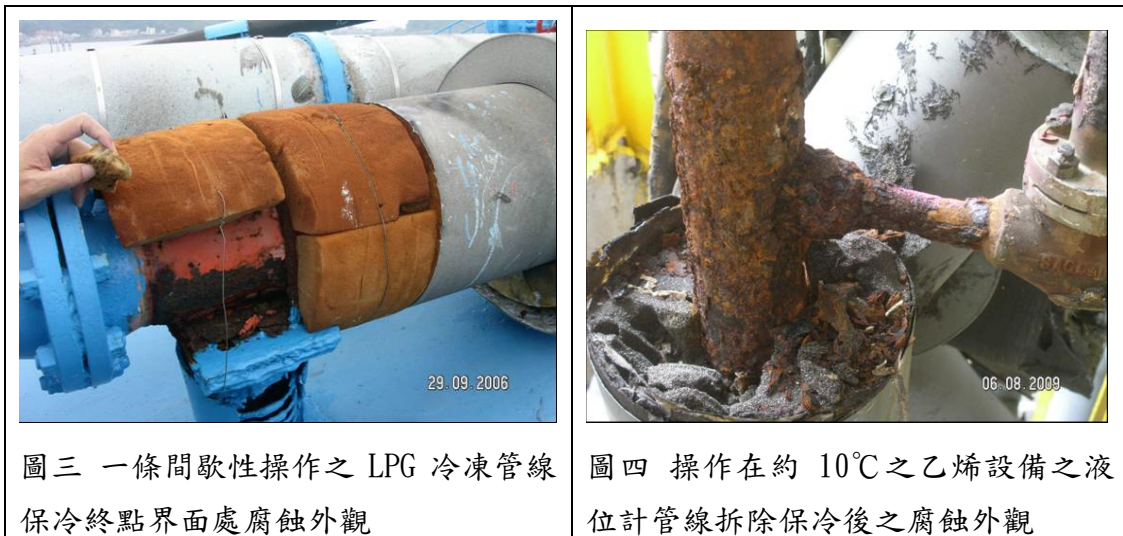
藉由虹吸作用，水份由下往上流的管道，因而腐蝕現象逐漸往上延伸，一旦局部區域發生腐蝕，此區形成陽極而塗覆良好區域為陰極，形成大陰極和小陽極效應，因而加速腐蝕導致壁厚減薄穿孔洩漏，此為典型 CUI 腐蝕劣化型態，經統計顯示腐蝕速率平均值約為 19.96mpy、18.21mpy、19.59mpy 和 12.37mpy，如表一所示，遠高於一般設計可容許值 5mpy，本案例為高於室溫操作設備 CUI 腐蝕之損傷案例，造成相當程度的經濟損失。



設備名稱	材質	操作溫度 (°C)	設計壁厚 (mm)	腐蝕速率分佈 (mpy)	腐蝕速率平均值 (mpy)
VA	碳鋼	41~72	14	17.8~22.1	19.96
VB	碳鋼	42~86	22	13.68~24.18	18.21
VC	碳鋼	44.8~63	12	16.88~22.49	19.59
CD	碳鋼	41.3~135	12	9.18~15.56	12.37

表一 塔槽 CUI 腐蝕速率

圖三為一條間歇性操作之 LPG 冷凍管線保冷終點界面，經拆除保冷後發現管線下半部存在嚴重腐蝕現象，圖四為操作在約 10°C 之乙烯設備之液位計管線拆除保冷後之腐蝕外觀，可發現存在嚴重之腐蝕現象。



以上三個實例均為隱藏在包覆層下所產生的腐蝕減薄現象，其腐蝕機制以及影響因素說明如下

三、CUI 影響因素探討

(一) CUI 腐蝕機制

包覆層下腐蝕顧名思義為水滲入包覆層下在設備和管線外壁產生腐蝕的現象，在碳鋼和低合金鋼材料不是因為包覆才發生腐蝕，而是原本存在水溶液就會和水中的氧氣電化學反應，形成全面性均勻腐蝕減薄，主要生成物為 Fe_2O_3

和 Fe_3O_4 , 腐蝕生成物為黃褐色, 包覆材主要扮演催化角色, 包括(A)包覆材和設備之間存在空間和間隙, 使水和其他腐蝕性因子能持續停留其中, 使設備長時間暴露於腐蝕環境中、(B)包覆材料具虹吸和吸附水的能力和(C)包覆材料含腐蝕性因子, 加速設備腐蝕, 包覆材下碳鋼的腐蝕型態呈現均勻腐蝕和局部腐蝕, 但大部分腐蝕為高度局部性, 且較為嚴重, 其腐蝕生成物呈現鬆散片狀, 腐蝕1mm壁厚約會產生7-10mm等量腐蝕生成物, 因此易造成包覆層鼓脹, 此一現象常是目視設備是否 CUI 的一項指標, 有些情況會呈現起泡狀蝕坑(常出現在塗覆失效老化區域), 均勻腐蝕會導致承壓(內壓、自重、風力和地震力等)不足而挫曲變形、傾倒或破裂洩漏, 局部腐蝕會導致穿孔洩漏。

(二)碳鋼和低合金鋼 CUI 的影響因素

1. 水的來源

水的存在是發生 CUI 必要條件, 水的來源包括外部滲入和設備表面冷凝水, 外部水的來源包括(A)雨水、(B)冷凝水塔的逸散、(C)蒸氣排放、(D)製程液體之溢流、(E)從低溫設備冷凝水滴下、(F)蒸氣加熱器損傷, 排放蒸氣之冷凝水和(G)消防水或溢流液體之噴灑, 水從包覆材缺口地方進入和設備接觸反應, 包覆材缺口來自設計不良、安裝不當、外力損傷和疏於檢修保養; 設備表面冷凝水來自於操作溫度低於室溫, 導致設備表面水結露的結果, 因包覆材非完全氣密, 因此設計上必須認知冷凝水也是水的來源之一。

2. 溫度效應

溫度在 CUI 問題上是一項重要因素, 高溫會加速碳鋼和合金鋼的腐蝕速率, 同時加速設備表面塗覆、密封材和黏著劑的老化, 而降低使用壽命, 然而高溫太高會導致水較易揮發而降低水和設備接觸時間, 減緩腐蝕, 由文獻顯示在密閉系統飽和氧的水溶液, 碳鋼的腐蝕速率隨著溫度升高而增加, 而包覆材下腐蝕類似密閉系統, 因此 API 定義易發生 CUI 的溫度範圍為 $-12^{\circ}C$ 至 $175^{\circ}C$, 溫度太低設備表面會結冰, 無水溶液存在, 溫度太高設備表面水氣被蒸發而保持乾式, 電化學腐蝕反應停止, 另外對於製程溫度的變化應列入考慮, 包括設備無連續操作、溫度隨著塔高度而不同, 在設備附屬組件附近溫度和停用設備等。

3. 腐蝕因子效應

CUI 問題之常見腐蝕因子包括海洋性環境之氯離子、重工業區排放之二氧化硫和金屬鹽類水解導致低 PH 值, 其作用為(A)增加水的導電度, 加速腐蝕速率、(B)破壞碳鋼表面因腐蝕生成物所形成之保護層和(C)直接和金屬進行電化學腐蝕反應, 腐蝕因子來源包括外來侵入和來自包覆材本身, 外來因子先在包覆外皮沉積, 接著在濕式氣份下, 由包覆外皮缺口滲入到包覆材,

再藉由包覆材虹吸作用、吸附或重力作用下擴散至金屬表面而起腐蝕反應，且在乾濕循環作用下，累積在金屬表面的腐蝕因子濃度也逐漸增加；此外包覆材本身多少含有腐蝕性因子，尤其氯離子，除非設計時特別強調無氯離子材料，包覆材的種類和型態也是影響 CUI 變數之一。

四、CUI 風險鑑別參數

設備和管線 CUI 風險評估考慮參數包括環境條件、腐蝕速率、操作時數、檢查效率、塗覆品質、塗覆時間、設備和管線結構複雜度(是否存在插管)、包覆狀況、管線/土壤界面和管線支撐等，彙整國內外相關數據和經驗值，以上參數討論如下

(一)環境因素

1. 操作溫度在-12~175°C
2. 在 60~204°C 範圍(API 數據)的不鏽鋼管線
3. 正常操作溫度在 120°C 以上，但只間歇性操作或停用設備
4. 暴露在冷卻水塔水氣溢散的區域
5. 在蒸汽排放裝置附近
6. 暴露在沖水系統的區域
7. 暴露於製程液體溢濺、濕氣和酸氣的區域
8. 從包覆管路凸出的滯流管和附件，其溫度常異於主管線操作溫度
9. 追蹤蒸汽洩漏的區域，尤其在接頭附近

(二)結構和包覆因素

1. 保溫層系統所有插入和分支的管線，包括死區管線，管線懸吊和支撐處、閥體、管鞋以及追蹤蒸氣進出口
2. 法蘭和其他構件包覆的終點
3. 保溫層外罩脫落或損壞的區域
4. 保溫層外罩接縫處位於水平上半部，或者外罩搭接不正確以及密合不良的區域
5. 直立管線保溫的終點
6. 密封填隙材料已硬化、分離或脫落者
7. 包覆層或外罩系統鼓起或髒污或者紮帶脫落者
8. 管路系統低點存在保溫分支，包含長跨距而無支撐架存在管線低點
9. 在高合金管線保溫層下存在碳鋼和低合金鋼的法蘭、螺栓和其他附件，會因加凡尼效應加速腐蝕
10. 測厚孔保溫密封不良

11. 管線系統震動而使得保溫層外罩損壞導致水分進入
12. 塗層或包覆劣化的管路
13. 低溫設備保冷材滴水、生黃鏽、長青苔和植物的區域
14. 設備混凝土防火裙板、支柱和 H 形鋼產生鼓脹和流出黃鏽區域

五、預防方案

歸納國內外 CUI 問題持續不斷, 主要因素為(A)為節省更多能耗, 因此很多較低溫的設備亦作包溫材包覆、(B)新的有機發泡材質保溫材, 大量使用、(C)新製程操作在更低溫度和循環溫度 (D)不鏽鋼大量使用、(E)早期設備塗覆品質不佳、(F)早期設備包覆材料懸則不當和品質較差、(G)設計和安裝不當、(H)沒有充分認知設備存在 CUI 的風險, 因而未定期進行包覆層和塗覆檢修以及設備檢查工作, 在防火材混凝土方面主要問題來自(A)不適當的混凝土混合、(B)鋼材未做塗漆處理、(C)錯誤的塗漆處理、(D)不當設計和(E)頂部未做塗漆、密封和防水處理。

有鑑於此, 目前工業界 CUI 安全管理策略, 主要為(A)水進入到包覆和設備是 CUI 發生的主因, 無水存在即無 CUI 問題, 因此藉由包覆材的設計和安裝來排除水分進入, 此為預防設備 CUI 洩漏的第一屏障、(B)包覆材長期使用難免會老化(尤其界面處), 因此應用品質佳和長效型有機塗層可有效延長設計壽命, 因此有人說塗覆壽命極為 CUI 發生的起始, 此為預防設備 CUI 洩漏的第二屏障、(C)對已操作多年的工場(10~15 年以上), 利用風險評估理念鑑別出 CUI 高風險的設備, 進行預知保養計劃, 包括(a)定期重新噴砂和塗漆、(b)包覆檢修和(c)加強定期檢查, 包括目視包覆層狀況, 拆包覆目視並輔以 UT 測厚或應用多項先進非破壞檢測技術在不拆包覆下檢查潛在 CUI 問題, 此為預防設備 CUI 洩漏的第三屏障。此外在不影響能耗和製程操作穩定下拆掉不必要的包覆, 外加保護籠罩: 對於一些因擔心人員燙傷而進行的保溫層施工方式, 可將保溫層拆除改用外加保護籠罩, 但設備仍需塗漆, 這比起包覆層費用低約 5~15%, 且將來維護費用低廉。

檢查技術方面發展重點為不拆保溫的情況下可檢查保溫層下之腐蝕, 主要技術包括

- (A)全型射線壁厚檢查(RT Profile):6”以下管線, 利用同位素射線透過保溫照射管壁壁厚的截面變化, 檢測時在管壁上放一小鋼珠做為壁厚定量量測比對用, 此方法和傳統 UT 測厚比較, 除不用拆包覆外, 其檢測為面式, 較易發現局部腐蝕的存在, 此方法用在設備和管線上的插管, 效果相當不錯, 但對設備殼板不適用。

- (B)RT 即時掃瞄系統：原理和傳統 RT 相同，用同位素 Gd-153 射源穿透管壁，另一端用 CCD 接收輻射強度，厚度愈厚，輻射強度衰減愈嚴重，將訊號變化量數位化，檢測時沿著管子長度或圓周方向掃描，可獲得管子厚度的趨勢，可清楚發現局部腐蝕的區域，此為線性 B 式掃描，另外一種設備為面式掃描，以不同顏色來表示不同壁厚值，此方法檢測速度快且檢出率高，僅適用在管線，且掃描工具有時受限管線緊密排列而無法使用
- (C)脈衝式渦電流：主要利用渦電流在材質中擴散會逐漸衰減，最後達底部消失的特性，來測量壁厚值，其作法為發射一脈衝渦電流，再以接收線圈接收其衰減時間，此法可不用拆除保溫層直接量測壁厚變化趨勢，為一快速篩選方法，如發現異常再拆包覆層輔以 UT 測厚較為準確，對小區域局部腐蝕常會發生低估或遺漏現象，此方法亦可檢測混凝土包覆之塔槽裙板和 LPG 腳柱等，檢測包覆厚度依廠商儀器規格可檢測包覆厚度在 200mm 以下之設備和管線，管壁厚度介於 4~40mm，管徑在 3" 以上至平板，探頭接觸溫度為 -100~550°C，鋁和不鏽鋼包覆外單皮不影響檢測，鐵皮可能受影響。
- (D)長距離導波技術：利用低頻探頭發出導波，音波沿著管壁傳遞，遇到管壁減薄區域，會產生不對稱回波，由此訊號來研判管線腐蝕程度和位置，此方法僅需拆除非部分管線包覆層來放置探頭，正常情況可檢測前後 30 公尺範圍，是一項全面式快速的篩選 CUI 的技術，對於發現的腐蝕再輔以 UT 測厚，此項技術訊號研判專業性較高。
- (E)紅外線熱影像：利用此項技術對設備和管線包覆層進行面式溫度量測，了解包覆是否異常，做為潛在 CUI 問題的篩選工具，但影響因素甚多，需配合多方資料才能正確判斷。
- (F)中子背面散射技術(NBS)：此技術主要是用來量測包覆層的含水量，含水量多的地方，CUI 風險愈高，其原理係利用氫會吸收高能力中子，然後反射出低能量熱中子，由偵測器接收，此方法是一項初步快速篩選工具，在檢出含水量高的包覆層仍需輔以其他檢測技術加以確認腐蝕嚴重程度。

六、結論

包覆層下腐蝕問題對碳鋼和不鏽鋼設備均具危害性，尤其台灣屬於潮濕多雨的海洋性環境，老舊工場設備潛在高風險性，安全管理策略，主要包括(A)強化包覆材的設計和材料選用以及提昇安裝品質，來排除水分進入、(B)應用高品質和長效型有機塗層，來延長塗覆之壽命、(C)利用風險評估理念鑑別出 CUI 高風險的設備，針對這些設備進行定期重新噴砂和塗漆、包覆層檢修和應用多項不同非破壞檢測技術加強檢查等預知和預防保養措施。

六、參考資料

1. W. I. Pollock and C. N. Steely, CORROSION UNDER WET THERMAL INSULATION, NACE.
2. Piping Inspection Code ,API 570, 2003
3. F.N. Speller, Corrosion-Cause and Prevention, McGrall-Hill Book Co.