

製程管線損傷案例解析和強化方案探討

台灣中油股份有限公司 煉製研究所 技術服務組

蘇俊吉、陳孟宏、許峰彰

摘 要

製程管線為工場各設備之間內容物的傳送管道，如同人類血管，一旦洩漏或堵塞將危及工場安全以及導致非計劃性停爐的經濟損失，依過去國外重大事故之經濟損失和發生頻率之統計數據顯示事故頻率以製程管線最高，約佔 34%，國內過去亦曾因多次因製程管線洩漏引起工安事件以及非計畫性停爐經濟損失，現場製程管線配置錯綜複雜、結構變性異性大、材料多樣化、內容物組成、相態以及流速各段差異大，因此在安全管理和檢修上不確定因素較其他設備多，再加上管線無法進入檢查以及檢查需拆保溫 and 搭架且國內目前對管線並無法定定期檢查規定等因素，以過去的作法較不易達到預防和預知保養的效果，本文首先藉由解析實際案例過去製程管線因損傷洩漏案例肇因，同時提出各成因之改善預防方案說明，最後就製程管線之完整性建置要項以及失效風險管理方法進行探討，以期將低工安/環保問題，經營環境惡化、降低非計畫性停爐，降低減產損失、縮短大修停爐時間，提高設備利用率和延長操作週期。

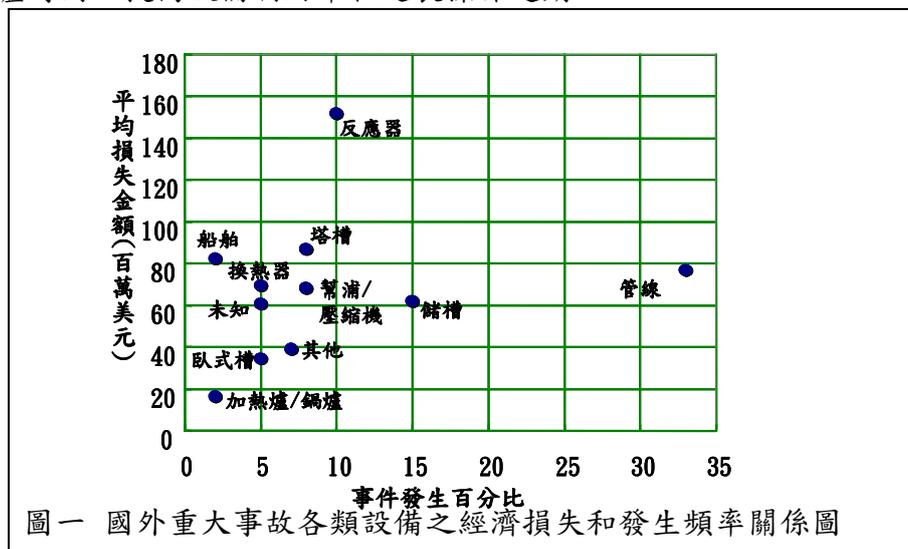
本文主要結果顯示

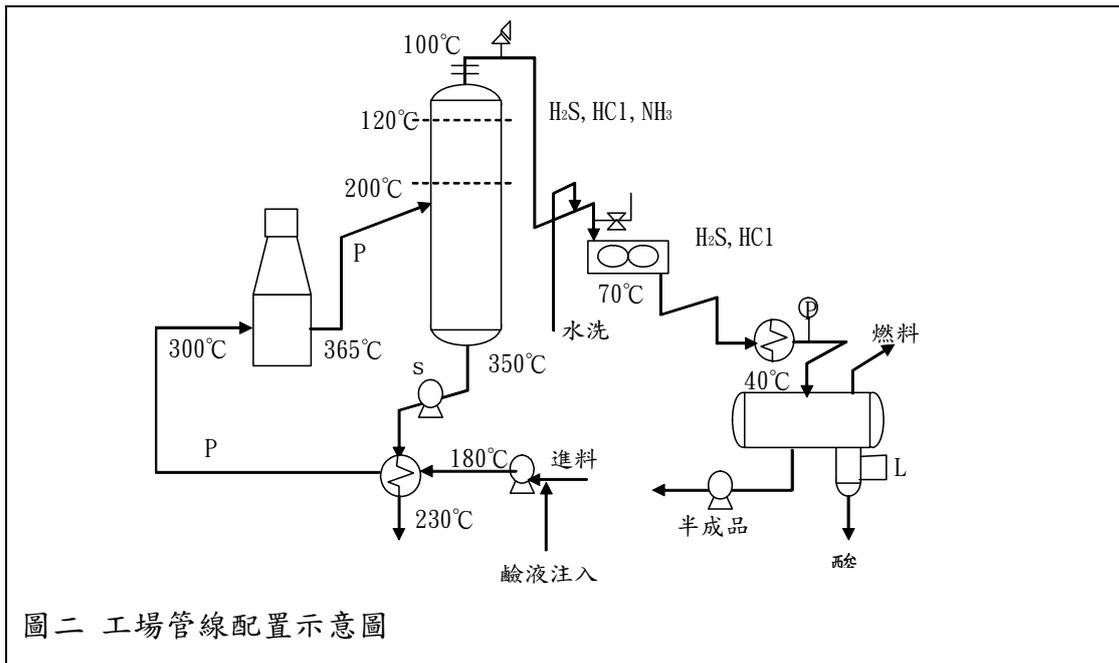
1. 經由實際案例解析顯示製程管線腐蝕劣化洩漏和設計、組裝焊接熱處理不符合工業要求、裝配材料控管不當誤用、檢查和保養失當等，且常因多項不當因素存在導致骨牌效應，因而產生洩漏事件，因此對於複雜的管線問題業主以及設計、操作、製造、檢查和維修等人員應充分認知管線安全完整性的要項以及進行風險評估。
2. 本文管線安全完整性以 OSHA 29CFR1910.119 為核心，彙整出建置管線完整性之相關參考規範架構以及應用風險基準檢查(RBI)評估來鑑別出潛在劣化風險因子，進而及早加以排除、改善或預防管控，同時可排定管線檢查優先順序、檢查方法以及檢查週期，以期將低工安/環保問題，經營環境惡化、降低非計畫性停爐，降低減產損失、縮短大修停爐時間，提高設備利用率和延長操作週期。

一、前言

煉製和石化製程主要由加熱爐、反應器、塔槽、換熱器、分離器、製程管線、轉動機械和儲槽等相關設備組成，其中製程管線為各設備之間內容物的傳輸管道，如同人類血管，一旦洩漏或堵塞將危及工場安全和導致非計劃性停爐的經濟損失，依過去國外重大事故之經濟損失和發生頻率之數據 (John, 1996) 依設備類別作成統計圖，如圖一所示，此圖顯示事故頻率以製程管線最高，約佔 34%，若依損傷肇因作統計，可發現機械性損傷為主要原因，約佔 41%，如圖二所示，國內過去亦曾多次因製程管線洩漏引起重大工安事件，製程管線主要元件包括管段、彎頭、插管、閥體、法蘭、鉸道、包覆和支撐/懸吊系統等，和其他設備(例如壓力容器、儲槽)比較，製程管線在管理和維護上的困難度相對較高，主要原因包括現場製程管線配置錯綜複雜、結構變性異性大、內容物組成、相態以及流速各管段差異大、管線無法進入檢查、檢查需拆保溫 and 搭架等，圖圖二所示，且國內目前對管線並無法規規定定期檢查；管線經年累月在高溫、高壓和高腐蝕性環境下操作，常因產生龜裂、減薄破管、變形和彎曲等現象而不堪使用，內容物又具易燃、易爆和具毒性等特性，一旦無預警的情況下發生洩漏，常導致工場產生非計畫性停爐之經濟損失和增加檢修的成本，嚴重者會導致工安環保事件，增加社會成本，間接影響企業經營的環境。

本文首先藉由解析實際案例過去製程管線因損傷洩漏案例肇因，同時提出各成因之改善預防方案說明，最後就製程管線之完整性建置要項以及失效風險管理方法進行探討，以期符合公司經營要求包括將低工安/環保問題，經營環境惡化、降低非計畫性停爐，降低減產損失、縮短大修停爐時間，提高設備利用率和延長操作週期。





二、製程管線失效實例解析

2.1 安裝設計不當案例

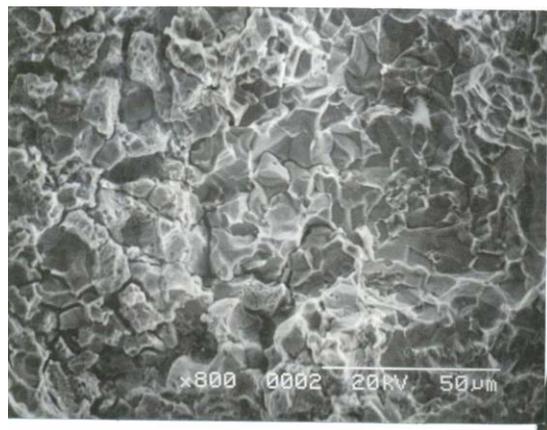
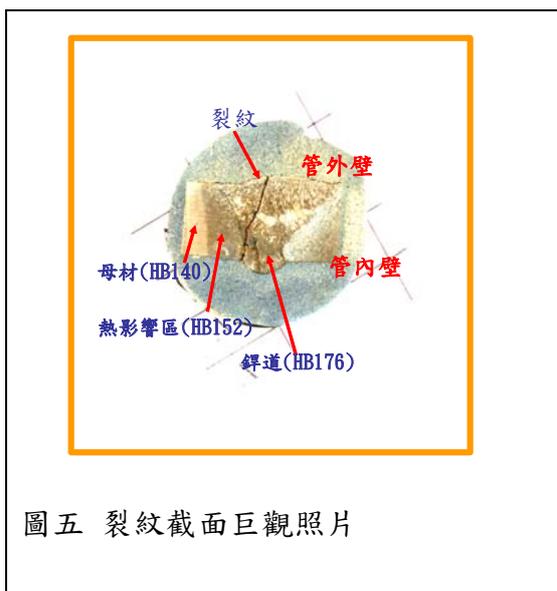
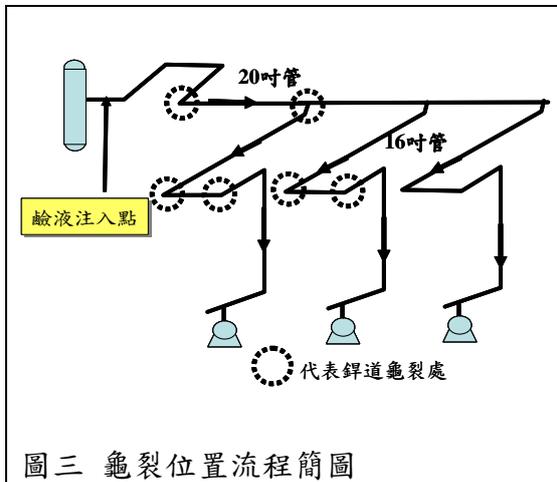
某一工場鹼性(NaOH)注入點下游管線銲道多處發生龜裂，導致漏油事件，如圖三所示，注入 15%鹼液的目的為防止下游管線和設備腐蝕用，操作溫度約在 140~160°C 之間，經液滲(PT)檢查裂紋外觀，如圖四所示，裂紋主要為銲道熱影響區之縱向裂紋、銲道上之縱向裂紋和銲道上之橫向裂紋等三種類型，經進行縱切面研磨分析，可發現裂紋主要起始於管內壁熱影響區和銲道上，裂紋無明顯分支，如圖五所示，母材、銲道熱影響區和銲道之硬度測試結果分別為 HB140、HB152 和 HB176，顯示無異常現象，裂紋破斷面之掃描式電子顯微鏡(SEM)照片如圖六，為延晶脆斷面型態，由上述裂紋特徵(無明顯分支，延晶脆斷)和操作分析，顯示裂紋型態吻合典型鹼性應力腐蝕裂紋特徵，有別於過負荷或疲勞所引起之破裂，而由碳鋼鹼性應力曲線(圖七)發現碳鋼並不適合使用在 140~160°C，15%鹼液中，研判主要肇因為鹼性注入點選擇安裝位置不當所致，此為變更管理的一環，機械設計者應提出變更管理計畫，諮詢材料工程師。

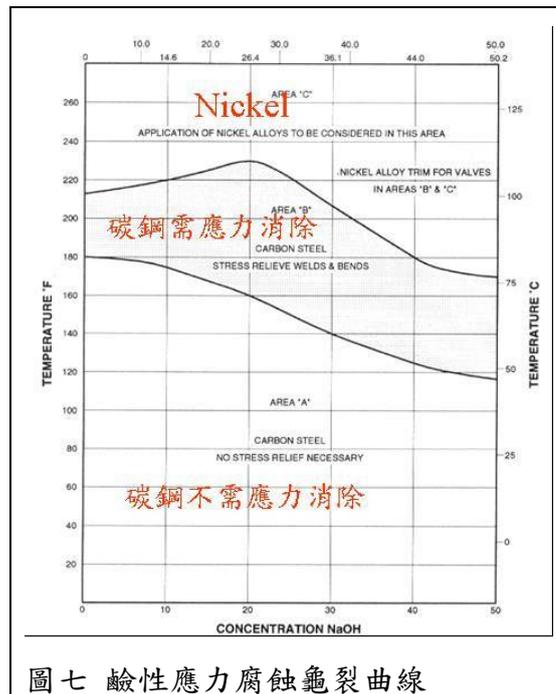
在 NaOH 與 KOH 鹼性水溶液中，鹼性脆化發生的可能性與鹼性濃度、金屬溫度與應力有關，增加鹼性濃度與升高溫度，有助鹼性應力腐蝕破裂的產生，若鹼性濃度有增加趨勢，則應力腐蝕破裂可能會因此而產生，

通常鹼性濃度在 50 至 100 ppm 之間時裂縫就會產生，鹼性應力腐蝕破裂之應力來源，可能為銲接或冷溫加工時之殘留應力或外界施與的應力

鹼性應力腐蝕之預防方案為依據鹼性曲線選擇適當材料、熱處理條件、注入點位置，(A)操作條件在 C 區應選用鎳基合金，不適用碳鋼，(B)操作條件在圖七中 B 區應對銲道進行銲後熱處理，由文獻資料顯示銲接完後進行溫度高於 595°C 以上銲後熱處理可消除 85% 以上之殘留應力，常用的碳鋼銲後熱處理溫度為 595°C~680°C，持溫時間為 1 小時/in、(C)若原來無鹼液注入而日後再增設，此時應對銲道進行銲後熱處理的變更管理措施和(D)改變鹼液注入點位置至較低溫度區域，例如 50~80°C 之間，可避開鹼性應力腐蝕的敏感性。

]



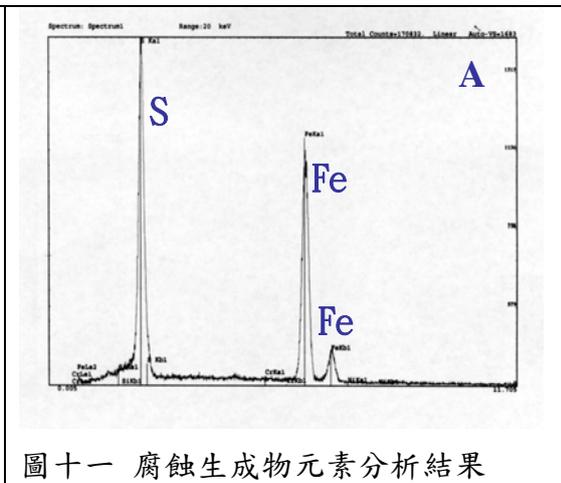
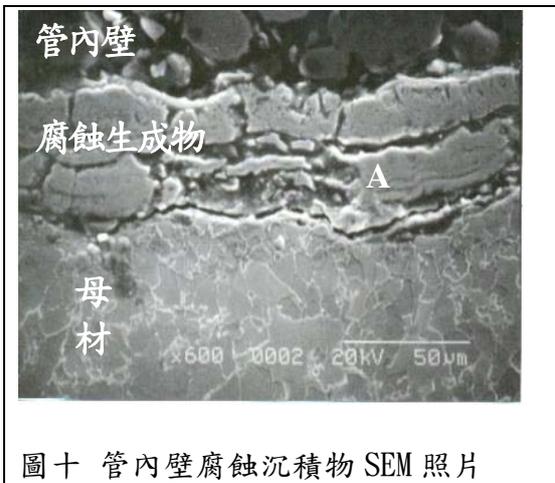
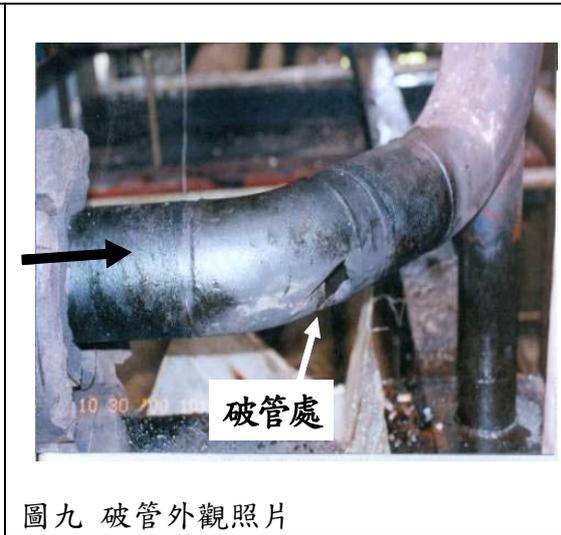
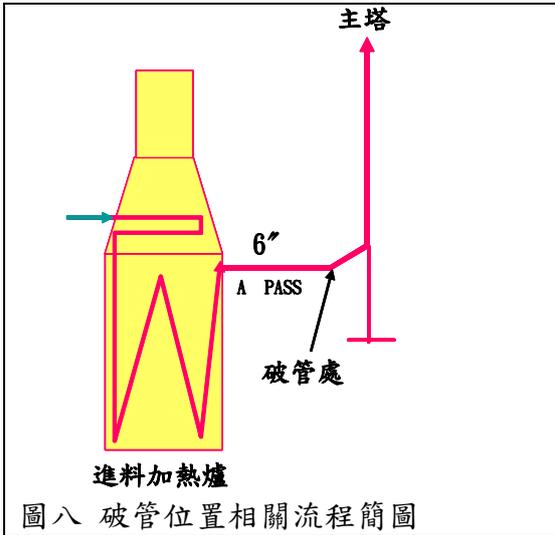


2.2 管線建造材質控管不當案例

一加熱爐出口管線其中一個 PASS 之 6 吋彎管操作不到 10 年發生破管，漏油火警事件，其洩漏位置流程簡圖如圖八所示，進料為含 3~4% 硫之油料，操作溫度約為 320~350°C，彎頭厚度設計值約為 8.4mm，彎頭材質設計為 5%Cr(WP5)，主要為抗高溫硫化腐蝕用，破管位在加熱爐出口第一個彎頭外肘側，如圖九所示，破管處附近壁厚已明顯減薄，殘留厚度約在 0.3~0.4mm 之間，經金相分析發現組織由肥粒鐵相和波來鐵相組成，不是 5%Cr 之金相組織，進而利用現場合金分析儀進行材質確認，發現破管之彎頭材質為碳鋼，非原設計 5%Cr(WP5) 材質，而其他 PASS 之彎頭和管線抽檢發現均為 5%Cr 材質，顯然此彎頭建造時被誤用，導致不耐高溫硫化腐蝕而減薄破裂。

利用實際操作溫度和油料之硫含量數據計算兩種材料的腐蝕速率，腐蝕速率計算結果分別為碳鋼:0.41~0.61mm/年，WP5:0.12~0.16mm/年，顯示碳鋼硫化腐蝕速率約為 WP5 之 3.3~3.75 倍之間，經掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察截面，發現內壁存在一層厚的腐蝕生成物，且呈剝離狀，如圖十所示，經 EDS 成分分析，顯示存在高量硫元素，且無鉻元素存在，如圖十一所示，此結果證實彎頭係因材質誤用為碳鋼而產生高溫硫化腐蝕減薄所致，此外彎頭外肘部位直接受流體衝擊而產生一額外沖蝕效

應，導致腐蝕生成物持續被沖離管壁而暴露出新鮮表面，而進一步遭受硫化腐蝕，因而加速腐蝕而破管，而 WP5 合金中存在鉻含量，有助於材質在高溫硫環境下生成一高熔點和低自擴散速率的緻密的腐蝕生成物，具減緩腐蝕的效果，因而具抗高溫硫化腐蝕，但碳鋼材質本身不含鉻成分，因此抗蝕性差，本案例肇因於管線裝配過程材料控管不當所致。



國外過去已發生多起因管線材質誤用而引發嚴重事故，且至目前仍持續有案例發生，主要案例包括(A)美國某大石油公司因 Elbow P5 材質誤用為碳鋼材質，導致破損發生火警，死亡三人，(B) 1993 年 8 月，美國路易西安那州一座石油焦工場，一條進料管線的 45 度直徑 6 吋彎管位於 40 英尺高的地方洩漏碳氫化合物，引發火警，消防人員和大火搏鬥了將近 3 個小時，中心工場停工長達 1 年，損失金額達 6520 萬美元，肇因於彎管以碳鋼材質製成的，並非原設計規範的 5%鉻合金鋼材，不耐

900°F 高溫腐蝕、(C) 鋁條誤用：5%Cr 鋁條用來鋁碳鋼釋壓閥體導致硬度過高，引發硫化腐蝕裂紋，發生火災和 (D) 1984 年 8 月 15 日加拿大，一座日煉 82,000 桶流體化床石油焦工場 10 吋油泥循環管線，因侵蝕減薄破裂，洩漏出接近自燃溫度的油料，導致該區域著火，約 2,700 桶油料由破裂管線以重力方式洩漏出，損失金額約為 7600 萬美元，金相檢驗顯示一段 18 吋長之碳鋼管不經意的插入 P5 材質管線中。

由於案例屢見不鮮，美國各大石油公司陸續推動 PMI 執行計畫，PMI 全名為 Positive Materials Identification，國內一般稱為材質確認，再保公司目前亦要求工場進行 PMI，以降低事故風險，過去國外公司 PMI 推動情形如下：(A) Amoco: 1979 年起對新購料作 100% PMI，(B) Chevron: 新建工程 100% PMI，對舊有設備 Cr-Mo 材質作 100% PMI，其餘抽樣，(C) Exxon: 1997 年起對新建工程和舊有設備作 100% PMI，(D) Mobil: 新建工程 100% PMI，舊有設備持續推動中；經粗略統計經 PMI 發現材質不符合比率約分佈在 2~20% 之間，各工場狀況不同而不同，顯示材質誤用的嚴重性，因此建議國內各煉製和石化廠新建工場或舊工場，應將 PMI 納入工程規範或檢修程序中，材料誤用來源包括供應商供料錯誤、業主庫存管理不善、領料誤領，裝配混料以及維修管線組件混料誤裝等，管線 PMI 執行的優先次序和選擇可依照管線風險評估結果，範圍包括維修進料、新建造工程和既存工場管線，重要設備種類包括：(A) 管線 (B) 管線 Fittings: tees, elbow, reducer, blinds 和 plug 等 (C) 法蘭 (D) 鍛件 (E) 閥體和釋壓閥 (F) 高壓鋁道 (G) 高壓儀表組件 (H) 金屬墊片 (I) 內襯材 (J) 螺栓。

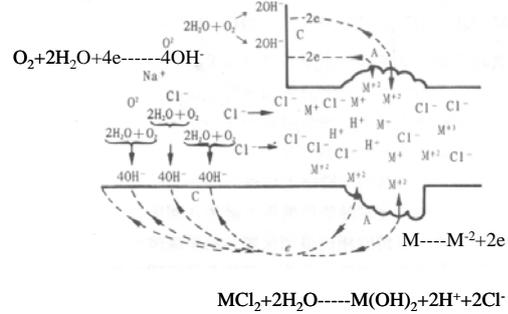
2.3 設計，檢查和保養間不當案例

一條 3 吋氫氣管線發生洩漏，無預警下發生氣爆，如圖十二所示，檢視破管處可發現管壁明顯減薄，而此處正好位在橫跨混凝土管墩處，金屬管線和混凝土管墩接觸位置形成間隙，再加上管墩積水不易散去，容易在界面處產生氧濃度差，而產生電位差形成電化學反應，導致間隙腐蝕的發生，其腐蝕機制如圖十三，因而位在和管墩接觸的管線加速腐蝕，導致破管，和其他管線比較，可發現橫跨管墩之管線裝設有管鞋者則無腐蝕現象，如圖十四所示，進一步對照管線設計規範，原文直接引用如下” All piping shall be pipe shoes for easily maintenance painting” ，顯然設計規範要求管線強制裝設管鞋以方便維護保養，因此本案例發生原因包括 (A) 設計時或裝配時無裝設管鞋，不符合設計規範要求、(B) 無意識到此潛在的腐蝕問題，因而無列入自動檢查或定期

檢查重點和(C)平時塗覆保養因管線無法抬高，而無法進行有效保養。



圖十二 氫氣管線破管外觀



圖十三 間隙腐蝕機制示意圖



圖十四 有管協和無管鞋腐蝕比較



圖十五 臨時管夾式，日久易發生間隙腐蝕

本案例改善措施包括(A)目視檢查發現腐蝕嚴重者優先進行夾管補強改善、但臨時管夾式，日久易發生間隙腐蝕，如圖十五所示，應列管追蹤，進行定期檢查和保養或於大修時裝設管鞋(B)無管鞋者定期檢查油漆及腐蝕情況，配合大修期間，陸續進行管鞋增設或鋼板貼補等永久性改善措施和(C)加強檢查此處腐蝕檢查，除目視外，超音波測厚無法進行，但目視無法量化，最新發展先進檢測技術說明如下：(a)電磁超音波(EMAT)：利用雙電磁超音波探頭，其中之一發射 lamb 波沿著管壁圓周傳遞，由另一探頭接收訊號，若存在腐蝕或孔蝕區域則所接收到的訊號振幅和到達時間會改變，由此來判斷壁厚是否減薄，不需耦合劑且屬於全面掃描和(b)圓柱導波法：利用電磁超音波探頭，發射一圓柱導波，波沿著管子長度方向傳遞，若存在腐蝕或孔蝕區域則會反射回來，由所接收到的訊號振幅和到達時間來判斷壁厚減薄程度和位

置。

三、製程管線完整性和風險管理

由以上實際案例解析顯示製程管線洩漏和設計不當、組裝焊接熱處理不符合工業要求、裝配材料控管不當誤用、檢查和保養失當等息息相關，且常非單一因素所導致，因此對於複雜的管線問題業主以及設計、操作、製造、檢查和維修等人員應充分認知管線安全完整性的要項以及進行風險評估，以下針對製程管線相關安全管理要項和風險評估作法加以探討說明

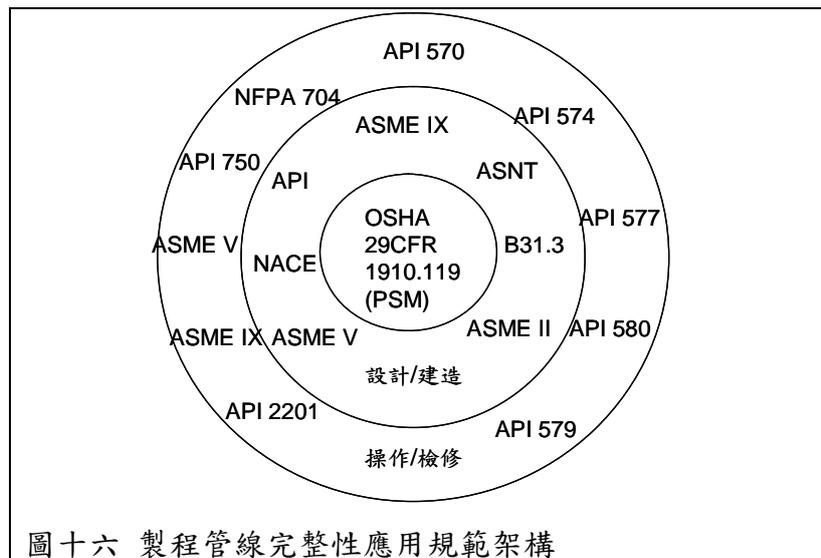
3.1 製程管線完整性

避免管線事故的最有效方法就是設計成本質安全，因此製程管線安全第一步應從設計、材料選用、製造和安裝的完整性做起，進而建置操作管理，以至於使用後的檢查和維修之完整性程序，圖十六彙整出建置管線完整性之相關參考規範架構，以 OSHA 製程安全管理(PSM)29CFR1910.119 為核心展開，PSM 其中一個章節規定需進行製程管線機械完整性(MI)，提供業主建置一個完整的設備和製程管線安全管理體系的指引，每一環節均需依循法規(code)、工業標準(standards)、工業規範(practice)、工業要求(requirement)和公司規範(specification)來進行、每階段過程應建立品質確認(QA)和品質控管(QC)程序，在人員和承攬商需加強訓練和認證，稽核以及變更管理不可少。

PSM(Process Safety Management)規定高危害化學品之加工、儲存、與搬運之設備必須設計、建造、維修與安裝使其洩漏風險降至最低，必須有設備完整性計劃以確保製程設備保持著完整性，設備完整性計劃之要素包括儀器之確認與分類、檢查與測試、檢查與測試頻率、制定維修程序、維修人員訓練、測試結果之接受標準、檢查與測試結果之文件、設備與儀器製造商提供之平均故障時間；每一設備都必須以風險或法規的要求為基礎，評估分類為關鍵或非關鍵設備，設備要符合之眾所認知之或優良之工程施行規範，對已不再使用之設計與建造規範、標準或施行規範，業主應對設備建立以安全為基礎之設計、維修、檢查、測試與操作的判斷與文件系統；變更管理包括製造之設備與設計不同時、安裝與 P&ID 顯示不同時、換修之零組件與原設計安裝規格或 P&ID 不同時、增加配件時、經事故報告或廠商通知建議必須更換零組件或其材質時、負荷改變時、用途改變時、啟用與停用、其他 MOC 程序事項；設備可靠度各項品管要求包括非破壞檢驗之 QA/QC、焊接程序之 QA/QC、新建工程和維修之 QA/QC、塗覆和內襯之 QA/QC、承攬商之 QA/QC。

煉製和石化製程管線設計主要依據 ASME B31.3，涵蓋相關管線和組件的

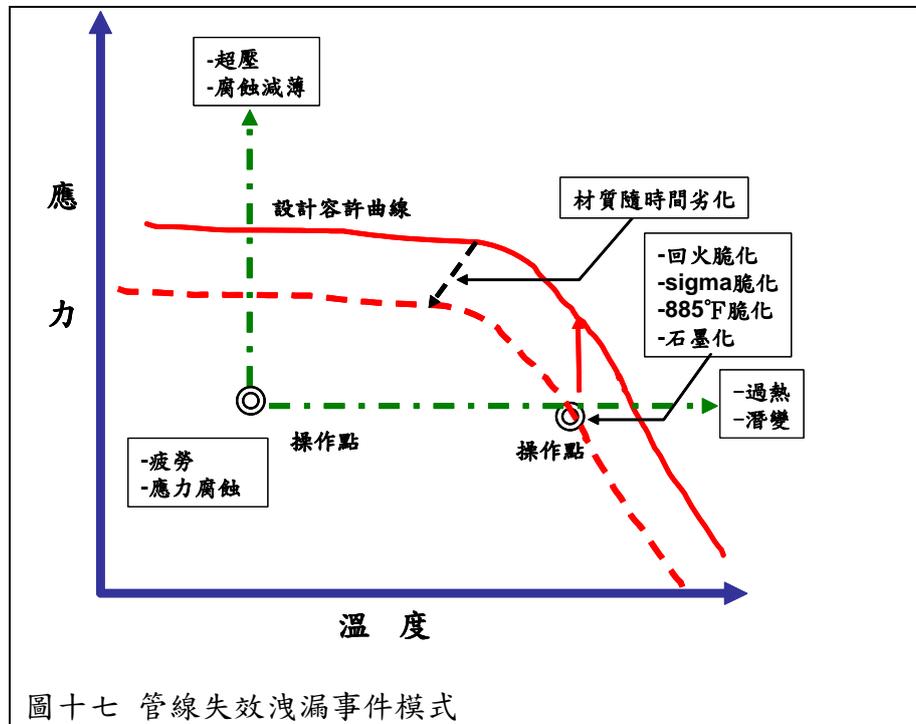
設計、材料等級、製造，裝配，組裝、彎曲、成形，焊接要求、預熱/層間溫度、熱處理、機械性質、檢查、檢驗和測試等；材料選用依據 ASME SECTION 11 Part A:鐵系合金、 Part B :非鐵系合金、 Part C:焊接材料、Part D:容許應力，ASTM、JIS、DIN 和 CNS 亦是常用之規範；當考慮腐蝕劣化性質常參考 API(美國石油協會)和 NACE(美國防蝕協會)工業標準或規範，以及相關文獻所發表之 MASTER CURVE 以及腐蝕速率等位圖(ISO-CURVE)，材料選用考慮因素包括(A)製程設計條件/腐蝕性:例如均勻腐蝕、局部腐蝕和應力、(B)腐蝕機械設計條件/機械性質強度:例如厚度要求、延性/韌性、硬度、低溫韌性、高溫強度和潛變、振動、(C)製造和結構條件:工廠和現場工作(設備和技工)、成型和彎曲、接合要求(焊接，牙接…)和(D)維修和經濟性:維護和銲補的容易度、產品曲容易度和價格；焊接程序和銲工檢定依據 ASME XI；非破壞檢查方法依據 ASME V；非破壞檢查人員資格檢定可依據 ASNT SNT-TC-1A 和 CP189，使用中的管線其檢查、變更、維修和汰換的標準則依據 API 570，API 574 提供檢查指引；API 581 提供設備和管線檢查風險基準的評估依據；API 579 提供使用後之管線劣化適用性評估的依據。



3.2 管線失效風險理念

管線材料在溫度和腐蝕環境作用下會隨時間產生減薄、龜裂、過熱和劣化等現象，導致管線失效而發生洩漏事件，其模式如圖十七所示，主要包括 (A)因減薄或超壓導致應力值超過設計容許曲線、(B)因操作條件過熱或超過潛變溫度臨界值，而發生破管、(C)操作點在設計容許應力下，但因疲勞或環境引起支應力腐蝕而龜裂洩漏和(D)材質本身特性劣化，導致材質脆化或使設計容許曲線往低應力和低溫移動接近操作點，對於上述各類潛在腐蝕劣化洩漏模式，應利用風險評估，來鑑別出潛在損傷因素和影響嚴重度，進而及早

加以排除、改善或預防管控，製程管線可依風險基準檢查(Risk Based Inspection, RBI)方式來進行



管線風險基準檢查評估為失效的可能性(機率)和失效嚴重度乘積之結果，失效可能性考慮的因素包括：(A)壁厚減薄型態：均勻腐蝕(酸蝕、高溫氧化、高溫硫化)、局部腐蝕(環己烷酸腐蝕)、沖蝕死區、(Deadlegs)腐蝕、包覆層下之腐蝕(CUI)、注入點(Injection points)、沈積物下之腐蝕、(B)環境引起之龜裂：例如不鏽鋼氯離子和聚硫酸應力腐蝕，碳鋼/低合金鋼鹼性應力腐蝕、碳鋼/低合金鋼硫化氫/HF 應力腐蝕、腐蝕疲勞、氫侵蝕、氫脆化、(C)溫度應力龜裂：潛變、低溫脆裂、結冰脹裂和(D)材質時效脆裂：回火脆化、sigma 脆化、885°F脆化和石墨化等，根據腐蝕劣化速率數據和檢查有效性，利用 limit State Function $g(Z)=R-L$ ，R 為設備材質抗力，L 為外在損傷力，求得失效機率 $PoF = \int_{x|g(Z)<0} f_x(x)dx$ ；失效嚴重度主要考慮由製程內容物的特性(毒性、爆炸性、燃燒性)、壓力、溫度、洩漏量和影響範圍來計算事故發生後對於人員安全性成本、設備損壞成本和企業停產經濟損失等整體財物損失，作為失效後果評估指標，計算不同內容物總洩漏量，此總洩漏量決定失效後果之嚴重性，重要考慮參數包括隔離區段內設備尺寸、相態、製程流體種類、有毒物質、設備價值、人口密度、人員傷亡成本和停產損失等，API 570 依洩漏可能引起的安全上與環境上之危害，分成三級，第一級：

一旦洩漏最有可能引起安全或環境等因素上立即的狀況者屬於第一類，例如 (A)內容物為可燃性且會自動結凍導致脆裂者，如 LPG、(B)壓力狀態下之內容物，而一旦洩漏或釋放後，會迅速氣化、產生蒸氣雲、形成爆炸性混合物者，例如 C2、C3、C4 之油料、(C)氣相中 H₂S 濃度超過 3 wt%者、(D)含無水氯化氫(Anhydrous Hydrogen Chloride)者和(E)含氟氫酸(Hydrofluoric Acid)者；第二級不屬於其他類別者歸為第二級，包括了大部分的工場區製程管線與一些區域外管線，典型例子為(A) 工場區之一般油料管線，漏出時會逐漸蒸發者、(B)氫氣、燃料氣、天然氣之管線和(C)工場區之強酸或強鹼管線；第三級內容物雖為可燃性，但洩漏時不太會蒸發，且該區域之作業活動並不頻繁者，內容物雖對人體組織有害，但位處偏僻地區者也可歸屬本類，以下為一些例子 (A)工場區之油料管線，但洩漏時不太會蒸發者、(B)蒸餾油及產品之輸送與灌裝管線和(C)工場區以外之酸液及鹼液管線，根據風險基準檢查評估結果可排定管線檢查優先順序、檢查方法以及檢查週期。

五、結論

1. 經由實際案例解析顯示製程管線腐蝕劣化洩漏和設計、組裝焊接熱處理不符合工業要求、裝配材料控管不當誤用、檢查和保養失當等，且常因多項不當因素存在導致骨牌效應，因而產生洩漏事件，因此對於複雜的管線問題業主以及設計、操作、製造、檢查和維修等人員應充分認知管線安全完整性的要項以及進行風險評估。
2. 本文管線安全完整性以 OSHA 29CFR1910.119 為核心，彙整出建置管線完整性之相關參考規範架構以及應用風險基準檢查(RBI)評估來鑑別出潛在劣化風險因子，進而及早加以排除、改善或預防管控，同時可排定管線檢查優先順序、檢查方法以及檢查週期，以期將低工安/環保問題，經營環境惡化、降低非計畫性停爐，降低減產損失、縮短大修停爐時間，提高設備利用率和延長操作週期。

六、參考文獻

1. John T. Reynolds, SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE MECHANICAL INTEGRITY OF PROCESS PIPING, 1996, HOUSTON p. 331.
2. Piping Inspection Code, API 570, 2003
3. Risk-Based Inspection Base Resource Document, API 581, 2000
Fitness For Service, API 579
4. 設備檢查作業準則，中油公司，民國 92 年

5. Klaus Stucker , Dagmar Kaljhof and Ludwig Hoin , "Cost benefit evaluation of risk-based maintenace" , PTQ , WINTER , 2001
6. Gert Koppe , "A method for improving plant reliability" , PTQ , SUMMER , 2000
7. PVRC'S CONFERENCE ON IMPLEMENTATION ISSUES IN RISK-BASED INSPECTION , PVRC , 2000
8. J. D. MARLOWE , C. J. BLOEMER , A. M. WATSON , T. RICHARDS AND C. UNDERWOOD , Reliability-based program assesses equipment assets , HYDROCARBON PROCESSING , DECEMBER , 2002