

石化設備腐蝕目視檢測技術建立

劉宏義^{*1}、吳興練¹、吳美惠¹、陳國銘¹、張耀南¹、董寶鴻²、余坤城²

Establishment of Corrosion Visual Inspection Technique of Petrochemical Equipment

Horng-Yih Liou^{*1}, Hsing-Lien Wu¹, Mei-Hui Wu¹, Kuo-Ming Chen¹
Yao-Nan Chang¹, Pao-Hong Tong², Kun-Cheng Yu²

摘要

由於石化廠歲修時間均很短，要大規模瞭解設備狀況必須借重非破壞檢測相關技術。因此，本研究之主要目的乃建立石化設備腐蝕目視檢測技術及檢測標準(DER評等法)、石化設備腐蝕分類、現場設備腐蝕分析及研判等技術。經過文獻蒐集及一系列之討論，建立了中鋼公司在石化廠腐蝕目視檢測之標準，包括：完成了「設備腐蝕檢測基本資料表」、「石化設備現場腐蝕檢測記錄表」、「石化設備現場腐蝕檢測系統之目視檢查表」、「石化設備腐蝕檢測劣化程度與評估值之關係」及「設備腐蝕調查表」等。配合正確的設備腐蝕分析流程，已經順利在公司內外石化廠歲修腐蝕檢測中使用，情形相當良好。檢測之結果，也可以作為風險評估(RBI)的基本資料，有助於申請延長設備檢查之通過。

關鍵詞：目視檢測；DER評等法；風險評估。

ABSTRACT

For understanding the safety of equipment, it was necessary to use the non-destructive examination technique during the short time of annual repairs. Therefore, the purpose of this study was to establish the corrosion visual inspection technique, inspection standard (DER evaluation method), corrosion category, in-field corrosion analysis and judgment of petrochemical equipment. During the literature surveys and a series of discussion, the evaluation standard of corrosion visual inspection of petrochemical plants was set up in China Steel Corporation. The data sheet of corrosion inspection of equipment, the in-field corrosion inspection record sheet of petrochemical equipment, the visual inspection sheet of in-field corrosion evaluation system of petrochemical equipment, the relationship of inferior degree and evaluation value of corrosion inspection of petrochemical equipment, and the

1 中國鋼鐵公司新材料研究發展處中鋼腐蝕測試中心

China Steel Corrosion Test Center, New Materials R & D Dept., China Steel Corp.

2 中國鋼鐵公司技術規劃發展處非破壞檢驗課

Non-Destructive Examination Unit, Technology Planning and Development Dept., China Steel Corp.

* 連絡作者：t113@mail.csc.com.tw

corrosion investigation sheet of equipment were all built in this evaluation standard. With coordination of proper corrosion analysis process of equipment, this evaluation method was successfully used in corrosion inspection of annual repairs of petrochemical plants. The results of examination were the important basic data for risk-based inspection (RBI) and were helpfully to pass the application of prolonging equipment examination.

Keywords: Visual inspection; DER evaluation method; Risk-based inspection.

1. 前言

由於石化廠歲修時間均很短，要大規模檢測設備狀況必須借重非破壞檢測技術(例如：目視檢測、超音波檢測、渦電流檢測等)。然而，一般非破壞檢測技術僅能判斷設備目前的損壞狀況，但對於設備的腐蝕傾向、劣化情形，乃至於未來運轉之剩餘壽命，則較難全面瞭解。因此，為了掌握設備目前及持續運轉之腐蝕劣化情形，建立石化設備腐蝕DER目視檢測技術及檢測標準、石化設備腐蝕分類、現場設備腐蝕分析及研判等技術，是本研究之主要目的。檢測之結果，也可以作為風險評估(RBI)的基本資料，有助於工廠申請延長設備檢查之通過。

2. 石化設備腐蝕分類

石化設備因功能不同大致上可以分為：容器、儲槽、加熱爐、塔槽、反應器、熱交換器及管線等，其中容器的主要功能為儲存少量氣體、液體或固體，作為操作過程之短暫滯留，其常發生之腐蝕損壞包括：均勻腐蝕、內壁局部腐蝕、保溫層下腐蝕、破裂、高溫氫攻擊...等。儲槽的主要功能為儲存原料、中間原料及產品，其常發生之腐蝕損壞包括：均勻腐蝕、沈積腐蝕、露點腐蝕、孔蝕、沉積水酸性腐蝕、土壤側之腐蝕...等。加熱爐的主要功能包括：將液體或氣體昇溫、將液體加熱為氣體、熱分解、管內裝填觸媒使流體改質等，其常發生之腐蝕損壞包括：耐火泥龜裂、高溫氧化、沖蝕、熔融鹽腐蝕、碳化、潛變、敏化、475°C 脆化、 σ 相脆化、氫脆、磨耗、應力腐蝕破裂及腐蝕疲勞...

等。塔槽的主要功能包括：利用空間速率差(停滯時間差)進行蒸餾、萃取、吸收、汽提、清洗等分離作用，來進行化合、分解、氧化及還原等反應，其常發生之腐蝕損壞包括：均勻腐蝕、磨耗、沖蝕、氫脆、氫引裂(HIC)、沈積腐蝕...等。反應器的主要功能使物質進行分解及聚合之化學反應，容易發生均勻腐蝕、磨耗、高溫腐蝕、氫脆、HIC、敏化及應力腐蝕破裂...等腐蝕損壞。熱交換器主要功能係以間接傳熱方式進行熱交換，常見之腐蝕破壞包括：均勻腐蝕、沖蝕、磨耗、銲道劣化、間隙腐蝕、加凡尼腐蝕及應力腐蝕...等。管線的功能為輸送液體或氣體至各單元設備，常發生之腐蝕損壞包括：沖蝕、沈積腐蝕、保溫層下腐蝕、銲道劣化、磨耗、應力腐蝕破裂...等。綜合以上的說明，大致上可以將石油加工製程的設備腐蝕型態分為11大類，如表1所示，其中分類方式係參考文獻^[1]及實際執行檢測經驗以及破損分析之結果。

3. 石化設備腐蝕DER目視檢測技術及檢測標準

為了大規模且非破壞性的進行設備歲修腐蝕調查，建立一套石化設備腐蝕目視檢測技術及檢測標準是必要的工作。由於國內目前並未有石化設備腐蝕目視檢測標準，故參考了橋樑的目視檢查精神^[2]，建立中鋼自有的檢查技術。

3.1 橋樑的目視檢查系統

有關目前橋樑的目視檢查方法主要分為DERU評等法及ABCD評等法。其中DERU評等法為昭凌

工程顧問公司為交通部國道高速公路局所開發之目視檢查評估準則，而ABCD評等法則為中華顧問公司為台灣省住都局所編訂的目視檢查評估準則^[2]。DERU橋樑目視檢測評估系統，係將橋樑構件劣化

情形分為劣化程度(Degree)、劣化範圍(Extend)及該劣化現象對構件安全性之影響度(Relevancy)三部份予以評估，並由檢驗員依據劣化構件維修之急迫性(Urgency)作對策之建議。評等方法係分別

表1. 石油加工製程的腐蝕型態。

Table 1 The corrosion category of petroleum refining process.

1. 高溫硫化物腐蝕(> 250°C 之設備高溫部位)
2. 高溫硫化氫/氫腐蝕(易發生再重整、脫硫、加氫裂解的高溫部位)
3. 高溫高壓氫腐蝕：(1) 氫攻擊，(2) 表面或內部脫碳(> 230°C 之高溫部位)
4. 高溫環烷酸腐蝕：有機酸腐蝕(總酸度大於 0.5 mg KOH/g 及 > 230°C 之高溫部位)
5. 低溫硫化氫-氯化氫-水腐蝕：氯化鈣、氯化鎂等無機鹽在 120°C 及有水條件下會水解，生成氯化氫(易發生蒸餾塔頂部)
6. 低溫硫化氫-水腐蝕：(1) 氫引裂，(2) 硫化物應力腐蝕破裂(易發生在重整、脫硫、異構化、加氫裂解的低溫部位)
7. 低溫二氧化碳腐蝕：碳酸腐蝕
8. 水溶液腐蝕：沖蝕、沈積腐蝕、沿晶腐蝕(敏化)、間隙腐蝕、加凡尼腐蝕、孔蝕
9. 高溫氧化、熔融鹽腐蝕
10. 材質劣化：潛變、過熱、回火脆性、熱疲勞、 σ 相脆化、475°C 脆化、應力腐蝕破裂、鹼性破裂、滲碳、疲勞、腐蝕疲勞
11. 其他

表2. 橋樑DERU檢測評等法之評估準則。

Table 2 The criterion of DERU evaluation method of bridge.

	0	1	2	3	4
程度(D)	無此項目	良好	尚可	差	嚴重損害
範圍(E)	無法檢查	< 10 %	< 30 %	< 60 %	> 60 %
影響性(R)	無法判定重要性	微	小	中	大
急迫性(U)	無法判定急迫性	例行維護	3 年內	1 年內	緊急處理維修

表3. 橋樑ABCD檢測評等法之判定標準。

Table 3 The criterion of ABCD evaluation method of bridge.

判定等級	狀況
A	損傷輕微，需做重點檢查。
B	有損傷，需進行監視，必要時事狀況補修。
C	損傷顯著，變形持續進行，功能可能降低，必須加以補修。
D	損傷顯著，有重大變形及結構物功能降低，為確保交通之安全順暢，或避免對第三者造成障礙，必須採取緊急補修。
N	無此項目或無法判斷結構物之損傷狀況。
OK	上述以外之場合

將構件劣化情形分為1 ~ 4級評等，若無此項目、無法檢驗或無法判定時，則以0予以記錄，故簡稱為DERU檢測評估系統(表2)^[3]。ABCD橋樑目視檢測評估系統主要強調建立系統化及組織化的檢查架構，為了避免遺漏任何檢查項目，以條列方式將每一個破損項目或檢查項目列出，並將劣化情形分為A ~ D級評等(表3)^[4]。

DERU與ABCD檢測評等法之比較如下^[2]：

- (1) DERU評等法強調大規模且快速地進行大量構件的初步檢驗與篩選評估，藉由1 ~ 4的數字記錄方式，達到精簡及快速之目的。
- (2) DERU評等法提供相當完整的橋況指標、優選排序指標之理論模式分析準則，可用來計算橋樑狀況指標(CI: condition index)、優選指標(PI: priority index)、功能指標(FI: functional index)及整體優選指標(OPI: overall priority index)。
- (3) ABCD評等法係逐項紀錄構件的劣化項目與檢查重點，較不會遺漏應檢查之項目。但缺點是需花費較多檢查時間，檢查表也相當複雜繁瑣，不適合大量構件的初步檢驗，也無法以理論分析橋樑之各種評估指標。

由於DERU檢測評等法的特性較適合石化設備歲修腐蝕檢測運作模式，故自行開發之目視檢查表即以DERU評等法的精神做為藍本。

3.2 石化設備腐蝕DER目視檢測系統

依據不同石化設備類別，歸納出應該檢測之項目，同時根據上一節石化設備可能發生之腐蝕現象及其劣化程度，分別訂出相關之D值。其中D值的範圍同樣分為1 ~ 4，1表示無明顯劣化，而4表示

劣化情形非常嚴重。另外，E值範圍的定義與橋樑目視檢測表相同，R值的大小範圍同樣為1 ~ 4，1表示劣化造成設備之影響度很小，而4表示影響度相當大，相關的評等準則如表4所示。同時，為了簡化實際設備劣化影響度之研判，已先依照各設備部位的重要性，統一定義出R值標示於目視檢查表中。如此，也可以降低檢測員必須同時進行D、E及R的研判工作，所導致之工作壓力及誤差。

表5為容器、儲槽、加熱爐、塔槽、反應器及熱交換器的「石化設備現場腐蝕檢測系統之目視檢查表」之範例，而其各別相對應之「石化設備腐蝕檢測劣化程度與評估之關係」範例如表6所示，這些對應關係為決定D值的關鍵步驟。另外，針對所有設備之檢測項目，其檢測完之DER值，將進一步計算其設備整體腐蝕破壞指標(IC, index of corrosion)，IC的定義如下：

$$IC = \frac{\sum_{i=1}^N (D_i + E_i) R_i}{\sum_{i=1}^N R_i}$$

當 $0 \leq IC < 3$ ，設備狀況屬於第一等級，安全無虞。當 $3 \leq IC < 5$ ，設備狀況為第二等級，也無安全顧慮，但必須提高抽檢比例。當 $5 \leq IC < 6$ ，設備狀況屬於第三等級，安全無虞，但必須增加檢測頻率或加裝腐蝕監測系統。當 $IC \geq 6$ ，設備狀況為第四等級，其功能堪慮，有嚴重腐蝕傾向，必須進一步進行細部檢測，以瞭解構造物破壞狀況。必要時立即停止使用，並進行設備維修或重建。

實際在現場執行目視檢測工作時，為了方便記錄，針對每一類設備的檢測位置均設計了「石化設

表4. 石化設備腐蝕檢測DER評等法之評估準則。

Table 4 The criterion of corrosion inspection DER evaluation method of petrochemical equipment.

劣化評等	0	1	2	3	4
劣化程度(D)	無此項目	良好	尚可	差	腐蝕嚴重損害
劣化範圍(E)	無法檢測	< 10 %	< 30 %	< 60 %	> 60 %
劣化影響度(R)	無法判斷相關重要性	微	小	中	大

石化設備腐蝕目視檢測技術建立

表5. 石化設備現場腐蝕檢測系統之目視檢查表。

Table 5 The visual inspection sheet of in-field corrosion evaluation system of petrochemical equipment.

設備名稱：XX 分離器					設備類別：容器					
目前檢測	重點		一般	V	設備編號：V-AAA					
前次重點檢測			前次一般檢測		V	設備檢驗位置或區域：100 區				
檢測單位	中鋼公司		檢測員	劉 XX、許 XX		設備型式：直立式				
運轉日期：86.11.10					上次檢測時間：90.11.11					
檢測日期：92.11.14					檢測結果：IC = 2.40					
檢測項目			劣化程度 D		劣化範圍 E		劣化影響度 R		(D+E)×R	
1. 本體(端板、側板、底板)腐蝕及裂縫檢測			1		1		4		8	
2. 壁板銲道及熱影響區腐蝕及裂縫檢測			1		1		3		6	
3. 外部油漆及保溫材脫落、腐蝕及裂縫檢測			4		1		2		10	
4. 支撐座腐蝕及裂縫檢測			1		1		3		6	
5. 人孔、法蘭面及補強板腐蝕及裂縫檢測			1		1		3		6	
6. 附屬設備腐蝕及裂縫檢測			2		1		2		6	
整體腐蝕破壞評估			$IC = \sum_{i=1}^N (D_i + E_i) \times R_i / \sum_{i=1}^N R_i = 2.47$							
代碼	腐蝕狀況	有	無	未確認	代碼	腐蝕狀況	有	無	未確認	
DF1	碳鋼及低合金鋼腐蝕破裂因子	V			DF7	發生均勻腐蝕	V			
DF2	低溫操作、回火脆性、低韌性		V		DF8	發生高溫潛變		V		
DF3	發生熱疲勞破裂及存在其因子		V		DF9	脫碳、球化、σ 相析出劣化			V	
DF4	發生高溫氫損傷		V		DF10	其他可確認之破壞機構		V		
DF5	γ 不銹鋼發生腐蝕破裂		V		DF11	定期由材料工程師評估	V			
DF6	發生局部腐蝕	V								
<p>檢測員意見：V-AAA 設備之腐蝕指標(IC, index of corrosion)為 2.47。根據 IC 的定義，當 0 ≤ IC < 3，設備狀況為第一等級，並無安全顧慮。故除了保溫材拆開，有輕微絕緣物下腐蝕(CUI)現象，必須加以追蹤；下端出口管線法蘭有較明顯 CUI 現象，建議適當維修以外。其餘設備狀況可以依照定期檢修之時程，進行例行性的維護及檢測工作。另外，兩次檢測 IC 值差異不大，顯示設備腐蝕狀況穩定。</p>										
0 表無此項目		0 表無法檢測			0 表無法判定相關重要性			是否需進一步檢測或監測?(Y/N)		
劣化程度(D)		劣化範圍(E)			劣化影響度(R)			N		
D 良好 尚可 差 嚴重損壞		E 局部 全面			R 微小 中大					
0 1 2 3 4		0 1 2 3 4			0 1 2 3 4					
		<10% <30% <60% >60%								

註：IC = Index of corrosion

表6. 石化設備腐蝕檢測劣化程度與評估值之關係(容器)。

Table 6 The relationship of inferior degree and evaluation value of corrosion inspection of petrochemical equipment (vessel).

檢測位置	劣化現象	劣化程度	D 值
1. 端板、側板、底板	均勻腐蝕	1. 無明顯銹蝕。	1
		2. 腐蝕速率小於 0.1 mm/y。	2
		3. 腐蝕速率在 0.1 ~ 0.5 mm/y 之間。	3
4. 腐蝕速率大於 0.5 mm/y。		4	
	局部腐蝕	1. 間隙腐蝕或孔蝕深度小於 0.5 mm。	2
		2. 間隙腐蝕或孔蝕深度在 0.5 ~ 1 mm 之間。	3
		3. 間隙腐蝕或孔蝕深度大於 1 mm。	4
	腐蝕破裂	1. 發生腐蝕破裂，破裂裂紋長度小於 10 mm。	3
		2. 發生腐蝕破裂，破裂裂紋長度大於 10 mm。	4
2. 壁板銲道及熱影響區	腐蝕及破裂	1. 無明顯銹蝕。	1
		2. 銲道加速腐蝕。	2
		3. 銲道加速腐蝕及破裂。	4
以下省略			

表7. 石化設備現場腐蝕檢測記錄表。

Table 7 The in-field corrosion inspection record sheet of petrochemical equipment.

設備名稱：XX 分離器				設備類別：容器					
目前檢測	重點	一般	V	設備編號：V-AAA					
前次重點檢測		前次一般檢測	V	設備檢驗位置或區域：100 區					
檢測單位	中鋼公司	檢測員	劉 XX、許 XX	設備型式：直立式					
運轉日期：86.11.10				上次檢測時間：90.11.11					
檢測日期：92.11.14				檢測結果：IC = 2.40					
檢測位置	檢測結果	<input type="checkbox"/> 無明顯腐蝕							
		<input checked="" type="checkbox"/> 均勻腐蝕			<input checked="" type="checkbox"/> 局部腐蝕			<input checked="" type="checkbox"/> 腐蝕破裂	
1. 端板、側板及底板	顏色	紅棕	黑褐		黑褐			黑褐	
	範圍%(E)	20	10						
	原始厚度 mm	10.5	10.5		X	X	X	X	X
	殘留厚度 mm	10.3	10.2		X	X	X	X	X
	運轉時間(天)	2194 天			X	X	X	X	X
	蝕孔深度 mm	X	X	X	0.5			X	X
	裂紋長度 mm	X	X	X	X	X	X	5	
	取樣編號	A-1	A-2						
	照片編號	A-1	A-2		A-3			A-4	
附註說明	端板	端板		側板			銲道		
備註	端板銲道有裂紋，必須剷修。								

表8. 設備腐蝕檢測基本資料表。
Table 8 The data sheet of corrosion inspection of equipment.

設備名稱：過熱蒸氣加熱爐	
操作溫度(°C)：INLET: 592 OUTLET: 845	設計溫度(°C)：COIL:1009 INLET: 730 OUTLET: 868
操作壓力(kg/cm ²)：INLET: 3 OUTLET: 1.5	設計壓力(kg/cm ²)：COIL: 3.2 INLET: 3.2 OUTLET: 3.2
內容物：STEAM SPHT	
外在環境：海濱石化工業區	
材質：A297 HP	
尺寸：152.4 OD * 9.525 ACW	
銲接方式：氬焊	
銲後熱處理：N / A	
起停機熱履歷：89年開車 90/92/93/94年各停車檢查一個月	
使用時間/年限：使用約五年 / 設定使用年限約11年	
設計法規：API RP 530	
以往檢查項目/檢查結果： 93年七月作金相檢測 OK 94年三月作本次腐蝕劣化檢測	
設備破壞狀況簡述：93年之前檢查結果均正常	

備現場腐蝕檢測記錄表」，儘量以勾選式配合試片取樣及照相編號之需求，也可以提醒實際檢驗人員不要遺漏了應該填寫及註記的資訊(相關的檢測記錄表範例如表7所示)。

3.3 現場設備腐蝕分析及研判

為了對於目視檢測之設備有一個初步的瞭解，並有助於實際檢測重點之掌握及後續腐蝕機構之研判，故設計「設備腐蝕檢測基本資料表」(表8)，在每一次檢測前，必須先跟客戶討論取得相關之資料，填寫的越詳細，狀況的掌握也就越清楚。



接著進行現場設備的DER目視檢驗，首先填寫檢測記錄表，進行必要的現場取樣及拍照。將檢測記錄表的原始數據，對照劣化程度與評估值之相關性轉換為DER值，並計算出IC值，IC值的大小直接反映出設備腐蝕之狀態。另外，IC值及目視檢測

表中的腐蝕狀況(DF1 ~ DF11，表示損壞機構嚴重係數)，也將做為全廠設備風險評估指標(RBI: risk based inspection)其中的一個重要之評分項目(API 581)。而取得之腐蝕生成物以XRD(X光繞射分析)配合SEM/EDS(電子顯微鏡/能量散佈光譜儀)分析，用以確認目視檢驗之結果及腐蝕因子的研判。分析完畢之腐蝕機構，配合適當的改善建議，將一併填入「設備腐蝕調查表」，完成整個歲修設備腐蝕檢測之工作(表9)。

4. 結語

本研究分別完成了「設備腐蝕檢基本資料表」、「石化設備現場腐蝕檢測記錄表」、「石化設備現場腐蝕檢測系統之目視檢查表」、「石化設備腐蝕檢測劣化程度與評估值之關係」及「設備腐

表9. 設備腐蝕調查表。
Table 9 The corrosion investigation sheet of equipment.

設備：燃燒塔油分離槽	
材質：SHELL A516GR. 70	
環境：濱海石化工業區；內容物：HYDROCARBON，CAPA 1992.4 M ³ .	
外觀：	
 <p>本體外觀</p>	 <p>設備爬梯</p>
使用時間：89.09. ~ 93.09	
腐蝕速率或破裂型態：0.175 mm/yr	
目視檢測：未開槽，本體外部許多位置油漆均嚴重剝離及腐蝕，特別在銲道位置銹皮厚度可達1公分，且部份銲道有熔填不完全或因腐蝕而使基座與槽本體分離。基座本身銹蝕相當嚴重，部份螺栓位置銹皮可達 5 mm。人孔法蘭及螺栓有銹蝕現象，附屬管線也有明顯銹蝕情形。另外，設備爬梯嚴重銹蝕，恐有工安危險，必須立即更換與本體連接之支架。	
腐蝕機構：塗層劣化、間隙腐蝕、加凡尼腐蝕及大氣腐蝕	
改善建議：槽本體、基座及附屬管線均需全面除銹後重新塗裝，部份螺栓可考慮換新。	

蝕調查表」，配合正確的設備腐蝕分析流程，已經順利在中鋼公司內外石化廠歲修腐蝕檢測中使用，情形相當良好。未來也將大規模推廣至國內其他相關的石化廠，對於國內石化設備的安全維護及風險評估，將有莫大助益。

參考文獻

1. 林師焱，耿文范，易邦旺，in：“石油加工腐蝕及耐蝕鋼”，冶金工業出版社，1991年，第16頁。

2. 李有豐，林安彥，in：“橋檢測評估與補強”，全華圖書(台灣，台北，2000年)，第7-1頁。
3. 台灣地區橋樑安全管理策略探討與制訂計劃，交通部科技顧問室，1997年。
4. 混凝土鋼橋一般檢測手冊，台灣省住宅及都市發展局，1996年。

收到日期：2004年7月31日
修訂日期：2005年8月8日
接受日期：2005年9月30日