

# 塗裝系統的評估

柏林公司塗料開發事業處課長 盧家鳳

## 摘要

本項腐蝕研究試驗是配合業主設計的塗裝系統，以不同塗料組合之設計塗佈在低碳鋼的素材上，進行腐蝕加速試驗、長期戶外曝露試驗並評估防護塗層的穩定性與耐久性。參考 ISO 20340 與 NORSOK M501 規範，選以 ASTM B117 鹽霧試驗、ASTM G85 改質鹽霧試驗、ASTM D4541 拉拔試驗、ASTM D2244 顏色差異及 ASTM D523 光澤度測試的合併評估進行探討。

ASTM B117 鹽霧試驗規範中提及所處的環境條件需管控設備與程序，長期以來扮演了一個評估塗膜在有腐蝕因子環境下的抵抗力，ASTM G85 改質鹽霧試驗比 ASTM B117 更接進大氣環境；ASTM D4541 拉拔試驗方法雖然有些限制，但卻能有效地、客觀地評估塗層的附著強度，塗層經過加速試驗測試後再次進行拉拔試驗，可以看到塗層的穩定性；UV 光的曝露可評估塗層老化的狀態。

腐蝕防護塗層的評估以「選擇材料的特性需符合最初設計的需求」為最重要的第一步！

## 一、前言

台灣為一海島，地處熱帶/亞熱帶，海洋環境/資源都非常豐富，但高溫、高溼與高鹽份的環境極易造成金屬在大氣中腐蝕劣化。依據 ISO 12944-2 腐蝕環境分類與各種標準金屬最初的腐蝕速率（表一）<sup>1</sup>，台灣沿海區域的腐蝕環境分類幾乎為 C5 等級，麥寮工業區還有 C5+ 的表現。

表一、ISO 12944-2 腐蝕環境分類與各種標準金屬最初的腐蝕速率

腐蝕性 分類	腐蝕速率 ( $\gamma_{\text{corr}}$ )				
	單位	碳鋼	鋅	銅	鋁
C1	$\text{g/m}^2/\text{yr}$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 10$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.7$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.9$	可忽視
	$\mu\text{m}/\text{yr}$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 1.3$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.1$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.1$	---

C2	$\text{g/m}^2/\text{yr}$	$10 < \gamma_{\text{corr}} \leq 200$	$0.7 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$	$0.9 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.6$
	$\mu\text{m}/\text{yr}$	$1.3 < \gamma_{\text{corr}} \leq 25$	$0.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 0.7$	$0.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 0.6$	---
C3	$\text{g/m}^2/\text{yr}$	$200 < \gamma_{\text{corr}} \leq 400$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 15$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 12$	$0.6 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2$
	$\mu\text{m}/\text{yr}$	$25 < \gamma_{\text{corr}} \leq 50$	$0.7 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2.1$	$0.6 < \gamma_{\text{corr}} \leq 1.3$	---
C4	$\text{g/m}^2/\text{yr}$	$400 < \gamma_{\text{corr}} \leq 650$	$15 < \gamma_{\text{corr}} \leq 30$	$12 < \gamma_{\text{corr}} \leq 25$	$2 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$
	$\mu\text{m}/\text{yr}$	$50 < \gamma_{\text{corr}} \leq 80$	$2.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 4.2$	$1.3 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2.8$	---
C5	$\text{g/m}^2/\text{yr}$	$650 < \gamma_{\text{corr}} \leq 1500$	$30 < \gamma_{\text{corr}} \leq 60$	$25 < \gamma_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 10$
	$\mu\text{m}/\text{yr}$	$80 < \gamma_{\text{corr}} \leq 200$	$4.2 < \gamma_{\text{corr}} \leq 8.4$	$2.8 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5.6$	---

資料來源：CNS 13401 (ISO 9223)

根據 ISO 8044 金屬和合金腐蝕的基本定義提到：腐蝕是各類金屬與它所處的環境間之物理化學的相互作用，而導致金屬屬性的變化，並且常造成金屬、環境或系統的損耗<sup>2</sup>。實際上金屬的腐蝕過程極為複雜，而氧氣和水是發生腐蝕反應的必要條件；如果能在金屬物件上覆蓋一個完全不透氧和水的塗膜，那麼腐蝕就不會發生。油漆塗膜是一個方便又有效地防止金屬腐蝕的方法，但是塗膜無法完全阻擋氧氣和水的進入！有相當多的研究探討塗料的防蝕技術及劣化的因子，都是為了有效地延緩金屬腐蝕的發生。

有機塗層保護機制概念大多來自於 Mayne<sup>3,4</sup> 和 Funke<sup>5</sup>，Funke 提出保護塗層需具備低的氧氣和水滲透，Osmotic：具有水可溶鹽類塗膜塗佈於（含有水可溶物質的）金屬基材上，接觸水/低濃度的電解液時，會因濃度梯度產生滲透壓，因金屬表面的濃度高於塗膜外部，水份開始滲透。當塗膜內外濃度一致時，滲透入內的水分將塗膜自基材撐起，塗膜外觀產生了水泡。（圖 1）此一現象即為 Osmotic blistering<sup>6</sup>。Mayne 提出塗層需要對離子有高的阻抗才能保護金屬材料，Electroendosmotic 則是塗膜破裂後，四周的鋼材成了富含電子的陰極，塗膜因此帶負電。在鹽水（或腐蝕電解液）中，外露的銹蝕陽極與週遭的披覆陰極（塗膜）間存在著電位差梯度。水分滲透塗膜到達陰極，加速塗膜自底材剝離形成水泡（圖 2）。而產生的 Electroendosmotic blistering。

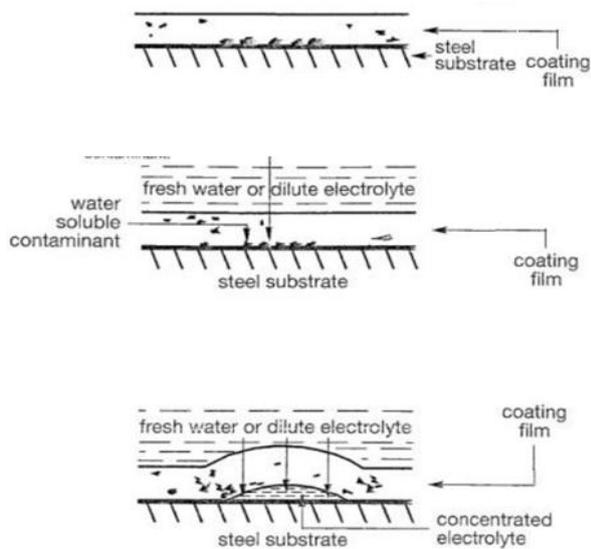


圖1、 Osmotic blistering

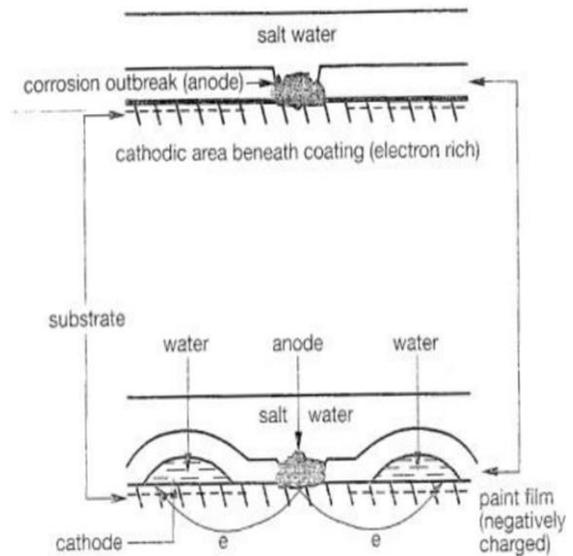


圖2、 Electroosmotic blistering

有機塗層產生老化劣化的因素有很多，而太陽光的紫外線之照射對塗膜的光澤影響頗為顯著；塗膜長期曝露在 C5/C5+的腐蝕環境(濕度與溫度的變化)及紫外線照射下，除了面漆光澤保持度的維持外，塗膜系統的缺陷、層與層之間的附著性，都是關注的焦點。然而需要哪些塗膜組成的防護才能達到延緩物體腐蝕與維持美觀呢？本項腐蝕研究試驗是以不同塗料組合的塗裝設計塗佈在低碳鋼的素材上，進行腐蝕加速試驗、長期戶外曝露試驗並評估防護塗層的穩定性與耐久性。

## 二、實驗方法

### 1. 試片製作

1.1 素材：低碳鋼，寬 100mmX 長 150mmX 厚 2mm。

1.2 處理：噴砂至 Sa 2 1/2、鋼刷除去表面浮銹至 St2。（系統 A~E 有 Sa2 1/2 與 St2 兩種試驗，H~O 僅 Sa2 1/2）。

1.3 塗料(由業主提供)選擇及簡介：

1.3.1 預處理劑：對金屬底材有極佳的潤濕作用及附著力。滲透型處理劑（柏林塗料）。

1.3.2 鋅粉底漆：有機樹脂配合金屬鋅粉末組成的犧牲型防銹底漆。ZR（R 廠塗料），Z-170、Z-171 & Z-520（柏林塗料），ZW（W 廠塗料），ZS（S 廠塗料）。

1.3.3 環氧底漆：抑制型薄塗的環氧樹脂防銹底漆。A-535（柏林塗料）。

1.3.4 環氧厚塗漆：遮蔽型厚塗環氧樹脂漆。ER（R 廠塗料），A-448（柏林塗料）。

1.3.5 環氧鱗片漆：有機樹脂配合鱗片的添加組合成遮蔽型厚塗環氧樹脂漆。GR（R 廠塗料），A-420（柏林塗料）。

1.3.6 環氧柏油漆：藉以柏油防水的特性配合環氧樹脂而成的遮蔽型厚塗漆。A-590（柏林塗料）。

1.3.7 PU 面漆：聚胺基甲酸酯面漆的耐候性及物化性能佳。UR（R 廠塗料），I-380（柏林塗料）。

1.3.8 氟素面漆：常溫硬化的耐候型氟素樹脂面漆。FR（R 廠塗料），FD（D 廠塗料），F-2000（柏林塗料）。

1.4 塗裝系統：如（表二）。

1.5 塗裝方式：空氣噴塗。

1.6 塗裝間隔：滲透型處理劑噴塗後立即上塗底漆；其他每道漆間隔 24 小時。

表二、塗裝系統一覽表

系統	A	B	C	D	E	H	I	J	K	L	M	N	O
預處理	滲透型 處理劑	滲透型 處理劑	滲透型 處理劑	----	----	----	滲透型 處理劑	----	----	----	----	----	----
第一道	A-535 (60 μm)	A-448 (150 μm)	A-535 (60 μm)	ZR (60 μm)	ZS (100 μm)	ZR (60 μm)	A-448 (150 μm)	Z-170 (60 μm)	Z-171 (60 μm)	Z-170 (60 μm)	ZR (60 μm)	Z-820 (50 μm)	ZW (60 μm)
第二道	A-590 (300 μm)	A-448 (150 μm)	A-420 (150 μm)	ZR (60 μm)	UR (60 μm)	ZR (60 μm)	A-448 (150 μm)	Z-170 (60 μm)	Z-171 (60 μm)	Z-170 (60 μm)	ZR (60 μm)	Z-820 (50 μm)	ZW (60 μm)
第三道	----	I-380 (60 μm)	A-420 (150 μm)	ER (150 μm)	UR (60 μm)	GR (150 μm)	FD (30 μm)	A-448 (150 μm)	A-448 (150 μm)	A-448 (150 μm)	GR (150 μm)	---	---
第四道	----	----	I-380 (60 μm)	UR (60 μm)	----	GR (150 μm)	FD (30 μm)	A-448 (150 μm)	A-448 (150 μm)	A-448 (150 μm)	GR (150 μm)	---	---
第五道	----	----	----	UR (60 μm)	----	FD (30 μm)	----	FD (30 μm)	FD (30 μm)	F-2000 (30 μm)	FR (30 μm)	---	---
第六道	---	---	---	---	---	FD (30 μm)	----	FD (30 μm)	FD (30 μm)	F-2000 (30 μm)	FR (30 μm)	---	---
總膜厚 (μm)	360	360	420	390	220	480	360	480	480	480	480	100	120

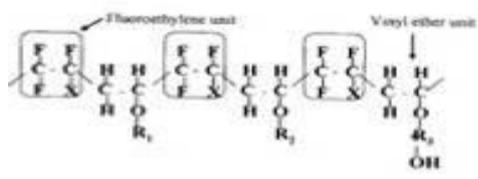
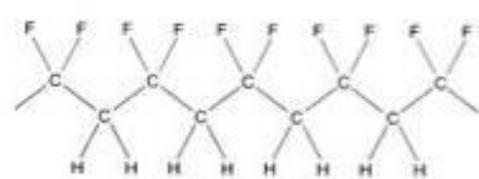
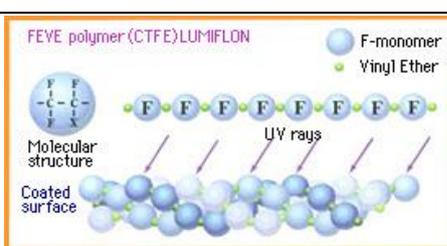
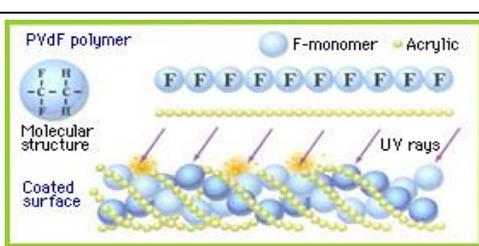
## 2. 塗料特性與原理

### 2.1 氟素樹脂面漆

氟素樹脂塗料為一高效能的材料，因為氟原子大可產生遮蔽效應，氟單體C-F的鍵能遠比紫外線來得大，可阻擋紫外線造成的破壞，因此具有極優良的耐候性能。氟素樹脂的結構可分成兩大類：PVdF與FEVE；本試驗氟素面漆均為FEVE Type，FEVE又以C-C所接的氟原子數量多寡與排列而有不同的產品類型。

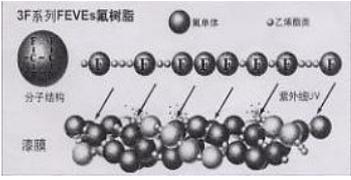
2.1.1 FEVE與PVdF的差異，如（表三）說明兩者因結構的不同而有應用的差異。

表三、FEVE與PVdF差別說明

樹脂類型	FEVE	PVdF
歷史與特性	-1980 年代由 Asahi Glass 研發 -常溫乾燥也可烘烤乾燥	-1965 年由 Pennsalt Company 開始推展 -必須高溫烘烤(~200°C)
樹脂結構	 <p>The diagram shows the chemical structure of FEVE polymer. It consists of repeating units: Fluoroethylene units (represented as -CF2-CH2-) and Vinyl ether units (represented as -CH2-CH(O-R1)-). The units are connected in a chain.</p>	 <p>The diagram shows the chemical structure of PVdF polymer, which is a chain of carbon atoms where each carbon is bonded to two fluorine atoms and two hydrogen atoms, forming a regular repeating unit (-CF2-CH2-).</p>
耐候示意圖	 <p>The diagram illustrates the molecular structure of FEVE polymer (CTFE) LUMIFLON. It shows a chain of fluorine atoms (F) and vinyl ether units (represented by blue and green spheres). UV rays are shown incident on the coated surface, which is composed of these polymer units.</p> <p>FE-VE-FE-VE-FE-VE---有規則的排列</p>	 <p>The diagram illustrates the molecular structure of PVdF polymer. It shows a chain of fluorine atoms (F) and acrylic units (represented by blue and yellow spheres). UV rays are shown incident on the coated surface, which is composed of these polymer units.</p> <p>應用時多與 acrylic resin 混合</p>
優缺點	-有規則的排列能有效的抵抗 UV 光 -常溫乾燥也可烘烤乾燥，應用廣	-有規則的排列,但添加 acrylic resin%受影響 -必須高溫烘烤(~200°C), 應用受侷限

2.1.2 FEVE 的類型及化學結構的作用<sup>14</sup>，雖然同是 FEVE 也還是有結構組成不同的類型，分為 3 氟與 4 氟（表四），而 FEVE 的化學結構作用與性能相關表現於（圖 3）展現。

表四、FEVE 的類型與化學結構及作用說明

類型	3F 的 FEVE	3F 的 FEVEs	4F 的 FEVEs
耐候示意圖			
差異點	<ul style="list-style-type: none"> <li>-C-C-接 3 個 F 成氟單體</li> <li>-氟單體+乙烯醚</li> <li>-排列有規則性</li> <li>-耐候性優</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-C-C-接 3 個 F 成氟單體</li> <li>-氟單體+乙烯酯</li> <li>-排列無規則性</li> <li>-耐候性受影響</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-C-C-接 4 個 F 成氟單體</li> <li>-氟單體+乙烯酯</li> <li>-排列無規則性</li> <li>-耐候性受影響</li> </ul>

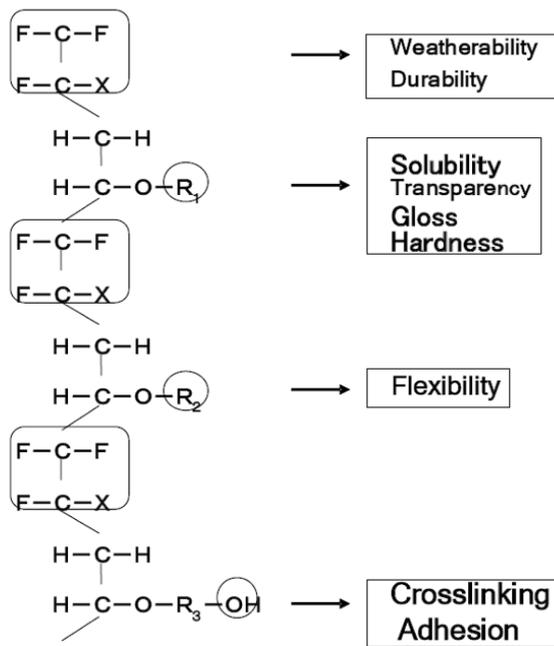
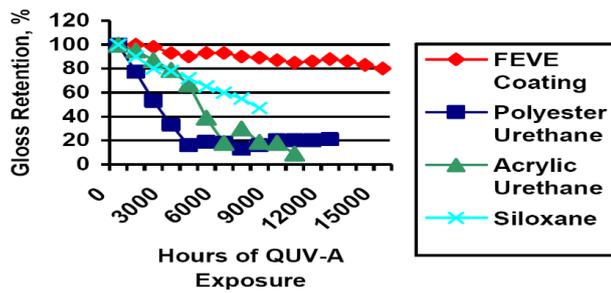


圖 3、FEVE 化學結構的作用<sup>15</sup>

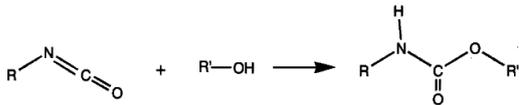
2.1.3 面漆耐候性的比較<sup>15</sup>，以四種塗膜同時進行超過 15,000 小時的耐候促進試驗(QUV-A)，結果於(圖 4)明顯看到 FEVE 塗膜在光澤保持率的表現最為亮麗。吳忠民等人<sup>16</sup>於麥寮工業區實際曝露試驗中觀察曝露 38 個月的結果，耐候性能以氟樹脂面漆的光澤保持率 79.5%最為理想。

圖 4、四種面漆經耐後促進試驗 15,000 小時後的光澤保持率%的展現



## 2.2 聚胺基甲酸酯面漆

聚胺基甲酸酯（或聚氨酯）（Polyurethane）一般簡稱 PU，意指塗膜聚合物中含有氨基酯（Urethane Group，-NHCOO-）。本試驗採用雙液型室溫反應的 PU 塗料，其反應機構如下：



PU 樹脂塗膜性質受 NCO/OH 比值而影響，其比值愈大，表示塗膜硬度較高，耐候性較好，硬化較快，當然游離的 isocyanate 含量越少。樹脂中含分歧 OH 基多寡及鏈長度也能影響塗膜硬度。多分歧狀及低分子量多元醇，可使樹脂內網狀結合密度增加進而造成硬碎，但抗溶劑性、抗藥品性強之塗膜。選用線性且分子量大之多元醇可造成柔軟之塗膜，兩者之間須適當組合，以獲得所須規格之塗膜。

## 3. 試驗項目

本腐蝕研究試驗項目採腐蝕加速試驗（ASTM B117<sup>7</sup>鹽霧試驗與 ASTM G85<sup>8</sup>改質鹽霧試驗）、大氣腐蝕戶外曝曬（柏林公司曝曬台），其試驗站設置依 ASTM G50<sup>9</sup>規範標準及塗層附著強度（ASTM D4541 拉拔試驗）三項評估。

3.1 腐蝕加速試驗：以 ASTM D1654<sup>10</sup> 評估腐蝕等級的差異。

3.1.1 ASTM B117 鹽霧試驗，試驗室條件：5%NaCl 水溶液噴霧、35°C、連續噴霧。

3.1.2 ASTM G85 改質鹽霧試驗，試驗室條件：pH=5.0~5.4、電解質水溶液（0.05%NaCl + 0.35%(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>）、1 小時噴霧\*室溫（24±3°C）、1 小時乾燥\*35±1.5°C。

3.1.3 等級評估如（表五）摘要述說

表五、ASTM D1654 摘要

規範	ASTM D1654 , Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosion Environments																																						
試片處理	步驟 1.清水沖洗（>45°C） 步驟 2.空氣吹乾（15 分）或刮除（叉痕處）																																						
應用	1.大氣曝曬 2.鹽霧試驗 3.耐候試驗																																						
評估	程序 A:(預留刮痕試片), 等級: 10~0 程序 B:(未打刮痕面積), 等級: 10~0 程序 C:(未保護邊緣), 等級: 10~0 程序 D:(其它形狀), 等級: 10~0																																						
規範評估表	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Creepage from Scribe in Millimeters (Procedure A)</th> <th>Percent Area Failed (Procedure B)</th> <th>Rating #</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Zero</td> <td>No Failure</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Over 0 to 0.5</td> <td>0 to 1</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>Over 0.5 to 1.0</td> <td>2 to 3</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Over 1.0 to 2.0</td> <td>4 to 6</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>Over 2.0 to 3.0</td> <td>7 to 10</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Over 3.0 to 5.0</td> <td>11 to 20</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Over 5.0 to 7.0</td> <td>21 to 30</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Over 7.0 to 10.0</td> <td>31 to 40</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Over 10.0 to 13.0</td> <td>41 to 55</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Over 13.0 to 16.0</td> <td>56 to 75</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Over 16.0</td> <td>Over 75</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>			Creepage from Scribe in Millimeters (Procedure A)	Percent Area Failed (Procedure B)	Rating #	Zero	No Failure	10	Over 0 to 0.5	0 to 1	9	Over 0.5 to 1.0	2 to 3	8	Over 1.0 to 2.0	4 to 6	7	Over 2.0 to 3.0	7 to 10	6	Over 3.0 to 5.0	11 to 20	5	Over 5.0 to 7.0	21 to 30	4	Over 7.0 to 10.0	31 to 40	3	Over 10.0 to 13.0	41 to 55	2	Over 13.0 to 16.0	56 to 75	1	Over 16.0	Over 75	0
Creepage from Scribe in Millimeters (Procedure A)	Percent Area Failed (Procedure B)	Rating #																																					
Zero	No Failure	10																																					
Over 0 to 0.5	0 to 1	9																																					
Over 0.5 to 1.0	2 to 3	8																																					
Over 1.0 to 2.0	4 to 6	7																																					
Over 2.0 to 3.0	7 to 10	6																																					
Over 3.0 to 5.0	11 to 20	5																																					
Over 5.0 to 7.0	21 to 30	4																																					
Over 7.0 to 10.0	31 to 40	3																																					
Over 10.0 to 13.0	41 to 55	2																																					
Over 13.0 to 16.0	56 to 75	1																																					
Over 16.0	Over 75	0																																					

3.2 大氣曝曬：耐候性能與腐蝕評估。

3.2.1 光澤保持率:

塗膜在大氣中受紫外線照射影響，其光澤度會逐漸降低，故於塗膜光澤上變化可評斷其耐候性能及劣化程度。塗膜光澤度測量依 ASTM D 523<sup>11</sup> 規定，本次試驗採用 60°角量測，其光澤保持率公式計算如下: 光澤保持率(%)=G/G<sub>0</sub> X100%（G<sub>0</sub>:原光澤，G:曝曬後光澤）。

3.2.2 色差（or YI 值）:

色相變化率依 ASTM D2244<sup>12</sup> 規範並採一般國際通用之色差公式 CIELAB 並依下列公式

$\Delta E_{ab} = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{0.5}$  計算色差值 (  $\Delta E_{ab}$  )。本試驗色差值量測採用符合上述規範之日本電工製造 NR-3000 手提色差計，光源設定為 C/2°並可自動換算色差值。因本次試驗的塗料面漆均為白色，致採以 YI 值 ( 黃變值 ) 評估之。

### 3.3 附著強度的測試：

依 ASTM D4541<sup>13</sup> 拉拔試驗得知塗膜接著的弱點及附著強度，繼而比較經腐蝕試驗後的附著強度落差，評估塗層耐久性及穩定性。

## 三、實驗結果與討論

1. 腐蝕加速實驗評估：[試驗 3,000 小時的結果如表六與圖 5 所示(程序 A 超過 3mm 判定 NG)]

表六、腐蝕試驗 3,000 小時的結果

系統		A		B		C		D		E		H	I	J	K	L	M	N	O
表面處理		Sa2 1/2	St2	Sa2 1/2															
程序 A	B117	3	2	3	5	4	4	7	5	6	6	6	3	7	7	7	8	8	8
	G85	0	1	3	1	0	1	3	2	1	2	3	0	8	1	8	3	8	8
程序 B	B117	10	10	5	10	5	10	10	10	5	6	10	6	10	10	10	10	-	-
結果		NG		NG		NG		NG		NG		NG	NG	OK	NG	OK	NG	OK	OK

[註]：程序 A(B117 與 G85 其中一項)腐蝕判斷在等級 6 以下(3mm ↑)即判定 NG

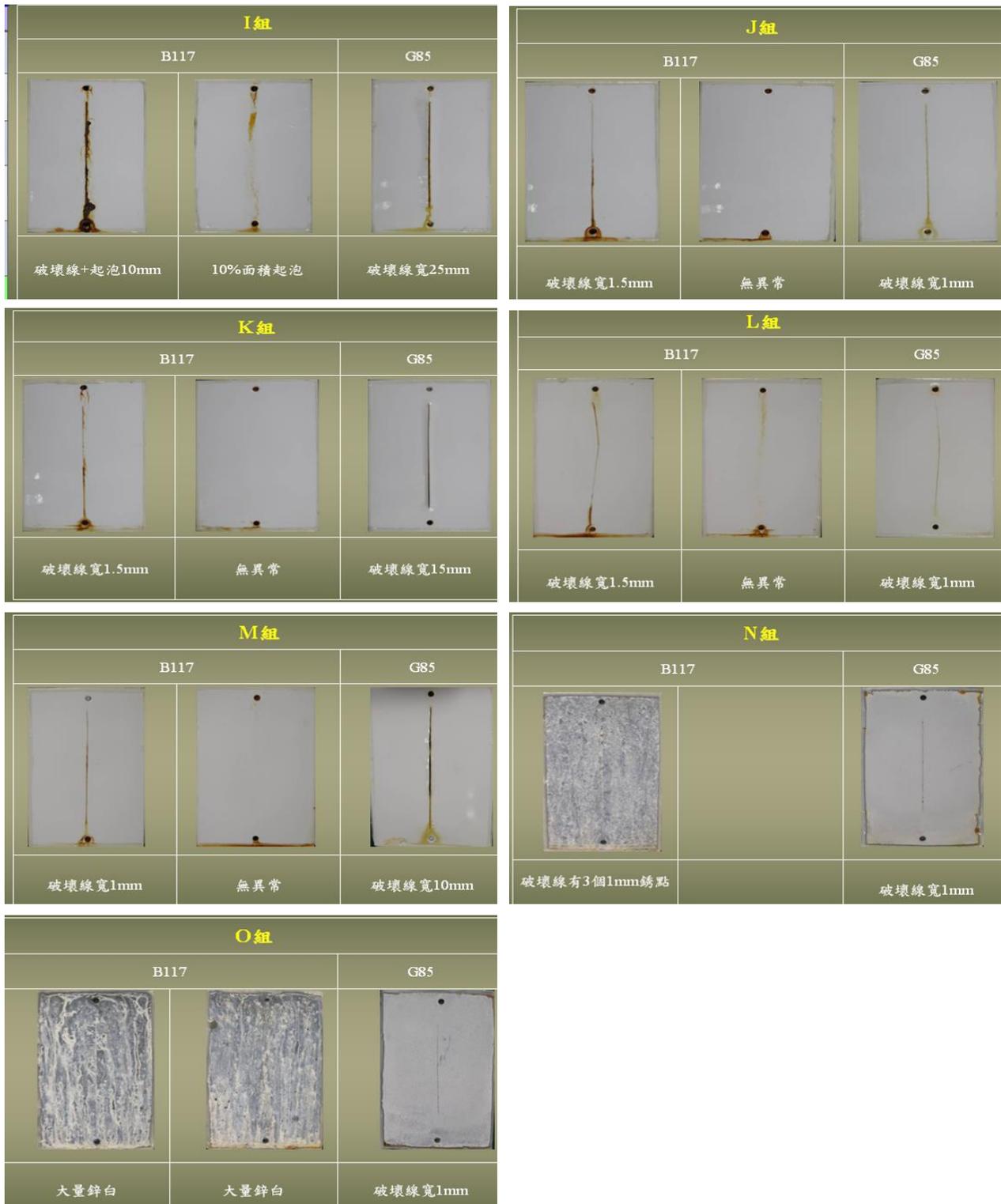
1.1 塗層若遭受碰撞或破損見底材時，犧牲型底漆(鋅粉底漆)於腐蝕加速試驗中的表現比抑制型與遮蔽型底漆的防腐效果理想；若塗層無破損，三者類型的底漆展現相當。然系統 D、H、K 及 M 的鋅粉底漆其犧牲保護效果無法彰顯，系統 D、H 及 M 的腐蝕擴散距離超過 3mm 且有銹水狀態，判定犧牲保護作用無法展現；而系統 K 雖然擴散距離也大於 3mm，但無銹水產生，在不同配方組合的鋅粉底漆的犧牲保護效能還是有些落差。

1.2 以程序 A 的結果，ASTM G85 腐蝕狀況比 ASTM B117 嚴重，加上很少有大氣環境如 ASTM B117 的試驗條件（連續噴霧），因此輔以 ASTM G85 的試驗是較客觀的評估塗層腐蝕狀況。

本試驗經 3,000 小時的腐蝕加速實驗合格的系統有：J、L、N、O。

圖 5、腐蝕試驗 3,000 小時的圖示





2. 大氣曝露的評估： [預計試驗 36 個月，結果如表七與圖 6 呈現]

2.1 光澤保持率：

2.1.1 氟素樹脂面漆比聚胺基甲酸酯面漆對紫外光線的抵抗較理想是眾所皆知的，聚胺基甲酸酯塗料(PU 面漆)雖然耐候性不錯，但是在大氣曝曬 6 個月後的光澤保持率大約降低 50%，而氟素面漆都還可以維持 80~90%的光澤保持率。

2.1.2 本試驗的氟素面漆有 3 家廠商的產品：FR (R 廠塗料)、FD (D 廠塗料) 與 F-2000 (柏林塗料)，在大氣曝曬 1,000 小時，D 廠的氟素面漆 FD 表面色澤斑駁不易洗淨，經過 9 個月的曝曬後，光澤保持率高但對環境落塵的抵抗性不佳，在工業區環境下可能塗膜美觀性會受影響；R 廠的氟素面漆 FR 在大氣曝曬 6 個月後就失去 50%的光澤，其產品的耐候性堪慮！柏林塗料的氟素面漆 F-2000 在大氣曝曬 6 個月後的穩定性佳，試驗持續進行。

2.2 色差 (or YI 值) 的評估：由於本試驗面漆的色相選擇白色，顏色變化由視覺上感覺差異不大。但由色差計所量得之黃變 (YI) 值，數據不低，此乃因色相變化除與塗料耐候性有關外，與耐污染性亦有絕對關係。

2.3 本試驗在大氣曝露的時間尚未完全結束，試驗繼續進行。

表七、大氣曝露試驗結果 (試片曝露於高雄市小港區沿海工業區的柏林公司)

系統	A	B	C	D	E	H	I	J	K	L	M	N	O
曝曬時間 (月)	15 個月					9 個月				6 個月			
光澤保持率 (%)	-	10	10	10	10	85	75	83	75	90	50	-	-
YI 值	-	7.60	11.94	5.83	5.26	6.10	7.24	7.45	8.10	2.72	6.41	-	-
程序 A	6	6	0	7	7	8	7	8	7	8	7	9	8
不理想的狀況	失光 粉化	失光	失光 起泡	失光	失光	耐污	耐污	耐污	耐污	OK	失光	-	-

[註]：不理想的狀況即塗層展現較為不佳的項目

圖 6、大氣曝曬評估圖示

系統	A	B	C	D	E
Sa 2 1/2					
St2					
光澤(%)	10% ↓	10% ↓	15%	10% ↓	10% ↓
YI 值	---	7.60	11.94	5.83	5.26

系統	H	I	J	K
Sa 2 1/2				
光澤(%)	78	70	75	70
YI 值	6.10	7.24	7.45	8.10

系統	L	M	N	O
Sa 2 1/2				
光澤(%)	78	40	---	---
YI 值	2.72	6.41	---	---

### 3. 附著強度的評估：[結果如表八與圖 7 所示]

3.1 塗層附著強度一直以來的探討與研究都與素材表面清潔度與粗糙度習習相關，本試驗的表面處理已將素材表面清潔度的變因控制住（不論噴砂的 Sa2 1/2 或 St2 都已排除污物），可以客觀測知底漆對素材的附著力；滲透型處理劑的加入對噴砂至 Sa2 1/2 的表面處理試片的附著力展現極度不理想，甚至還影響塗層腐蝕試驗與大氣曝曬試驗的結果，而在 St2 試片的附著力展現穩定，經探究原因為噴塗施作時的間隔時間不夠所致。可見塗料的施作條件之正確性的重要。

3.2 塗裝設計中，層與層的塗料/塗膜相容性足以影響系統的穩定性與耐久性。系統 H~K 的面漆為 D 廠塗料的氟素面漆 FD，對中塗的附著性有不穩定的趨勢，是需要注意的！而系統 E 的底漆（S 廠塗料的鋅粉底漆 ZS）與系統 O 的底漆（W 廠塗料的鋅粉底漆 ZW）均呈現不利塗料上塗的趨勢。單獨產品有不錯的特性，並不代表一定適合塗裝系

統的應用。

3.3 塗膜附著強度不一定需要很高或最高才是最好，而是經過腐蝕試驗或是老化試驗後依然維持初始狀態，此塗膜的穩定性與耐久性在評估腐蝕防護塗層是很重要的一環！本試驗附著穩定性合格的系統有：B、D、J、K、L、M、N。

表八、附著強度的評估

系統	A		B		C		D		E		H	I	J	K	L	M	N	O	
表面處理	Sa2 1/2	St2	Sa2 1/2	St2	Sa2 1/2	St2	Sa2 1/2	St2	Sa2 1/2	St2	Sa2 1/2								
初始附著強度(MPa)	1.80	4.81	6.63	6.65	1.50	5.23	4.50	4.30	6.18	6.60	6.37	3.67	6.84	3.19	6.84	6.01	2.46	1.81	
試驗後的強度 MPa	B117	1.53	2.23	7.81	6.97	1.73	4.54	5.41	5.74	6.59	4.02	7.38	1.31	6.15	3.07	5.13	5.75	2.55	0.95
	G85	1.56	1.93	6.43	6.80	0.89	3.96	4.60	5.70	3.74	2.78	4.44	1.77	7.14	3.95	6.44	5.96	2.77	1.98
塗層剝離狀況	底漆 A	中塗 C	AB 膠 A	AB 膠 A	底漆 A	底漆 A	底漆 C	底漆 C	中塗 A	中塗 A	底漆 C	面漆 A	面漆 A	底漆 C	AB 膠 A	面漆 A	底漆 C	AB 膠 A	
保持度%	40~85		97		59~75		100		42~60		69	35	90	96	75	95	100	52	
結果	NG		OK		NG		OK		NG		NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	NG	

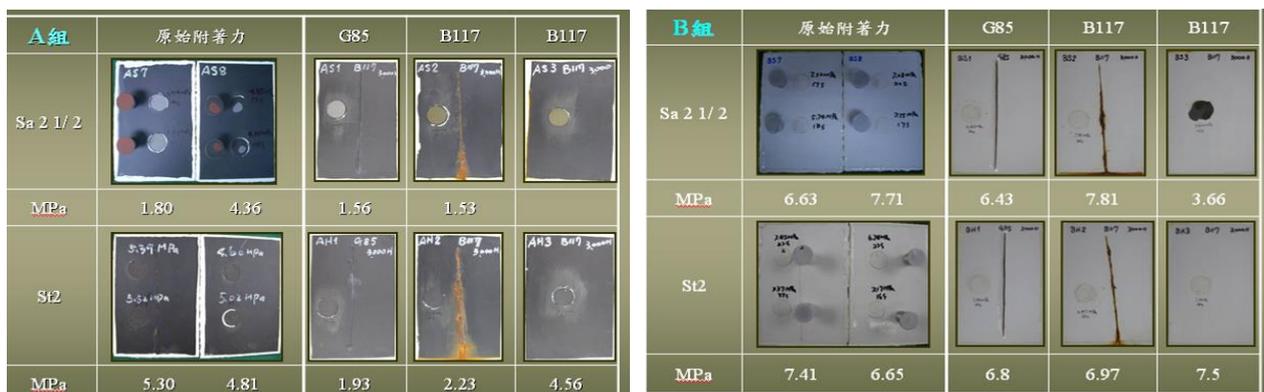
[註]：1. 初始強度數據以最低值紀錄之，試驗後的 data 以有刻劃破壞的為主。

2. 剝離狀況敘述 A=Adhesion, C=Cohesion

3. 附著力降解(保持度)需維持 70%，否則即判定 NG (試驗後/初始的\*100%)

4. 腐蝕試驗 3,000hrs 後的附著強度的條件：試驗試片自試驗環境取出,以水沖洗表面,進而以布拭乾置於室溫環境, 4hrs 內黏貼 dolly, 24hrs 後拉拔 test

圖 7、附著強度的穩定性與耐久性圖示



C組	原始附着力		G85	B117	B117
Sa 2 1/2					
MPa	1.55	1.50	0.89	1.73	2.38
St2					
MPa	5.79	5.23	3.96	4.54	5.42

D組	原始附着力		G85	B117	B117
Sa 2 1/2					
MPa	4.81	4.50	4.6	5.41	6.21
St2					
MPa	4.71	4.30	5.7	5.74	6.03

E組	原始附着力		G85	B117	B117
Sa 2 1/2					
MPa	6.18	7.67	3.74	6.59	7.06
St2					
MPa	6.60	7.01	2.78	4.02	5.32

H組	原始附着力		G85	B117
Sa 2 1/2				
MPa	6.37		4.44	7.38
剝離 狀況 說明	80% 鋅粉漆之層內剝離 (cohesion)		100% 鋅粉漆之層內剝離 (cohesion)	100% 鋅粉漆之層內剝離 (cohesion)

I組	原始附着力		G85	B117
Sa 2 1/2				
MPa	3.67		1.77	1.31
剝離 狀況 說明	90% 氟樹脂面漆與epoxy 中塗的層間密著 (adhesion)		100% 氟樹脂面漆與epoxy 中塗的層間密著 (adhesion)	100% Epoxy中塗與滲透 型處理劑的層間密 著(adhesion)

J組	原始附着力		G85	B117
Sa 2 1/2				
MPa	6.84		7.14	6.15
剝離 狀況 說明	50% 氟樹脂面漆與 epoxy中塗的層間 密著(adhesion)		40% 氟樹脂面漆與 epoxy中塗的層間 密著(adhesion)	30% 氟樹脂面漆與 epoxy中塗的層間 密著(adhesion)

K組	原始附着力		G85	B117
Sa 2 1/2				
MPa	3.19		3.95	3.07
剝離 狀況 說明	100% 鋅粉漆之層內剝離 (cohesion)		100% 鋅粉漆之層內剝離 (cohesion)	100% 鋅粉漆之層內剝離 (cohesion)

L組	原始附着力		G85	B117
Sa 2 1/2				
MPa	6.84		6.44	5.13
剝離 狀況 說明	50% AB膠與氟樹脂面 漆層間剝離 (adhesion)		40% AB膠與氟樹脂面 漆層間剝離 (adhesion)	40% 鋅粉漆之層內剝離 (cohesion)

M組	原始附着力	G85	B117
Sa 2 1/2			
MPa	6.01	5.96	5.75
剝離狀況說明	98% 氟樹脂面漆與鱗片中塗的層間密著(adhesion)	100% 氟樹脂面漆與鱗片中塗的層間密著(adhesion)	90% 氟樹脂面漆與鱗片中塗的層間密著(adhesion)

N組	原始附着力	G85	B117
Sa 2 1/2			
MPa	2.46	2.77	2.55
剝離狀況說明	100% 鋅粉漆之層內剝離(cohesion)	90% 鋅粉漆之層內剝離(cohesion)	80% AB膠與鋅粉漆的層間密著(adhesion)

O組	原始附着力	G85	B117
Sa 2 1/2			
MPa	1.81	1.98	0.95
剝離狀況說明	100% AB膠與鋅粉漆的層間密著(adhesion)	90% AB膠與鋅粉漆的層間密著(adhesion)	90% AB膠與鋅粉漆的層間密著(adhesion)

#### 四、結論

在本試驗中對腐蝕防護塗層提出新的見解，結合不同測試手法評估不同防蝕塗裝材料在低碳鋼上的防護，繼而評估塗層在大氣曝露的穩定性與耐久性，從實驗中的結果得下述結論。

- 1、素材的表面處理與施工程序是建立塗裝系統的穩定性與耐久性的根基。適當的材料/產品若塗裝在不適當的素材表面上，無法展現此材料/產品的特性，塗裝系統就無法展現防護功能；施工程序與條件的不當，也無法呈現完整塗膜的效益！因此，在選擇適合的塗裝系統或防護產品前，最重要的是應當先確定如何施作、素材的表面處理及塗裝條件的認知。
- 2、本試驗主要評估 C5 以上大氣腐蝕環境的防護塗裝，塗層設計採多道次塗裝且厚度約 360~480  $\mu\text{m}$ 。每道塗膜都有其作用，塗裝系統的組合是讓塗層比單道塗膜的防護更理想，因此，如果層與層間的附著無法彰顯，出現相容性的問題，反而造成塗層的缺陷/剝離，腐蝕狀況即明顯提早到來。
- 3、ASTM B117 與 ASTM G85 兩者規範差異除了噴霧程序不同外，電解液的濃度也不同。腐蝕

加速試驗經 ASTM G85（電解液濃度低）測試，試片破壞處呈現不同於 ASTM B117（電解液濃度高）的腐蝕蔓延距離，銹的產生量也較 B117 的試片少，也就是說電解液濃度較高時產生的生銹量是相對高的；而以 ASTM G85 在乾濕循環條件測試的腐蝕蔓延距離較能客觀地看到塗層系統除了保護機制外，還有其他機制是材料本身的變因所致。而腐蝕試驗後產生的缺陷蔓延並無法解釋塗層附著力的優劣，經附著強度評估初始與試驗後的結果呈現不一樣的趨勢。

- 4、在防護塗層抵擋紫外光線的侵襲下，因有機樹脂的結構受到影響或破壞而造成光澤展現的降低，與塗料組成有關。相同屬性的產品因塗料組成不同，經本試驗測試結果呈現明顯的落差。
- 5、本試驗評估腐蝕防護塗層的穩定性與耐久性展現最佳的塗裝系統依序為：L>J。系統 B 需再多注意施工程序應會有不錯的展現，而 M 與 D 的表現雖不差，應再確認材料的穩定性。其餘系統的穩定性尚需考量。
- 6、這項試驗成功地且客觀地評估各系統的腐蝕防護狀態。然而，實際的腐蝕條件無法以單一試驗說明與驗證，而是由更多可能發生的機制組合成的；由本次腐蝕加速試驗可以充分認識有機塗層的保護機制，但不能以此解釋所有的腐蝕行為。

## 參考文獻

- 1· 陳桂清、柯正龍、羅俊雄、劉益雄，構造物腐蝕環境分類之潛勢分析研究，交通部運輸研究所，2010。
- 2· Huichao Bi, Corrosion Protection by Paint - Cathodic Disbonding, 2010。
- 3· J.E.O.Mayne, Anti-Corrosion Methods and Materials, 1973。
- 4· J.E.O.Mayne, J.O.C.C.A, 1949。
- 5· H.Haagen and W.Funke, J.O.C.C.A, 1975。
- 6· 陳哲生，設備的防蝕塗裝，中工高雄會刊，第 17 卷，第 3 期。

- 7 · ASTM B117, Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus °
- 8 · ASTM G85, Standard Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing °
- 9 · ASTM G50, Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals °
- 10 · ASTM D1654, Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosion Environments °
- 11 · ASTM D523, Standard Test Method for Specular Gloss °
- 12 · ASTM D2244, Standard Test Method for Calculation of Color Difference from Instrumentally Measured Color Coordinates °
- 13 · ASTM D4541, Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers °
- 14 · ASAHI GLASS COMPANY 產品說明書 °
- 15 · Ultra-Weatherable Fluoropolymer Coatings for Bridges °
- 16 · 吳忠民, 耐候型塗料於麥寮地區曝曬行為研究, 防蝕學會, 民國88年 °