

通信系統材料之腐蝕及其防治措施研究

洪耀宗*¹、王志華¹、徐希白¹、林益全¹、劉日煬¹、施漢章²

Studies on Corrosion Behavior and its Prevention Methodology of Telecommunication System Materials

Y. T. Horng*¹, J. H. Wang¹, H. P. Hsu¹, Y. C. Lin¹, J. Y. Liu¹, H. C. Shih²

摘要

通信線路系統材料，包含：金屬材料、合金材料、電子接點、高分子材料及水泥建物等。連接電話中心局間與用戶間之構成稱之為線路，線路一般由地上的線材設備與地下管道設備組合而成，前者包括：明線、電桿、自持線及光電纜等設備；後者則包括：管道、人手孔及洞道等設備。線路金屬材料與環境之交互作用產生不同型態之腐蝕。本研究利用大氣腐蝕暴露試驗、陰極防蝕法及交流阻抗測試等方法探討通信線路系統材料之腐蝕特性及其防治方法。

關鍵詞：線路；人手孔；洞道；大氣腐蝕試驗；陰極防蝕；交流阻抗。

ABSTRACT

The telecommunication systems outside plant are made of a variety of materials: metals, alloys, electrical contacts, polymers, concrete structure and so on. The wires which connect telephone offices to subscribers and to other telephone offices and the objects which support them are called outside plant. The outside plant is composed of line plant and underground plant. The former includes open wires, telephone poles, self-supporting wire, cables and optical fiber. The latter includes ducts, manholes, hand-holes and cable tunnels. The interaction between the outside plant metal components and the environment leads to various types of corrosion. Measurements of atmospheric exposure test, cathodic protection and ac impedance technique have been conducted to evaluate the corrosion behaviors and its prevention control of telecommunication systems.

Keywords: Outside plant; Manholes; Hand-holes; Cable tunnels; Atmospheric exposure test; Cathodic protection; AC impedance.

1 中華電信研究所

Telecommunication Laboratories, Chunghwa Telecom Co., Ltd,

2 清華大學材料科學工程研究所

Department of Materials Science and Engineering, National Tsing Hua University

* 連絡作者：hyt751173@cht.com.tw

1. 前言

通信用戶迴路系統 (subscriber loop infrastructure of telecommunication) 由電信機房及不同管道所構成之線路架構組合而成，該系統使用不同種類的金屬材料並曝露在不同的環境中。用戶迴路系統，由電信機房至用戶住宅包括了：線路設備、機房交換設備、電力設備與用戶設備等，形成一完整之通信線路架構 (telecommunication plant)，並藉由此一通信線路架構，提供用戶不同的、更好的與更多樣化的服務。其中線路設備 (outside plant) 多數均長期曝露於大氣環境中，因此受到溫度、溼度、風力、鹽害、污染物等因素之作用尤其明顯，此等設備若缺乏良好之維護或防蝕措施，將使通信系統加速產生劣化 (degradation)，縮短其使用年限，一般電信材料常用之防蝕技術，如圖1所示。這些設備所使用的材料包括：熱浸鍍鋅鋼材 (hot-dip galvanized steel)、不同材質之金屬接點、地下管道之鉛被電纜光纜等。腐蝕種類包括：大氣腐蝕 (atmospheric corrosion)、硫害氣體產生之腐蝕 (sulfurous-gas induced corrosion)、地下人孔產生之污水腐蝕 (flooded manhole corrosion) 及硫酸還原菌產生之腐蝕 (sulfate-reducing bacteria, SRB) 等，不同型態之腐蝕現象導致材質之劣化，均足以影響通信品質。本研究之目的即在介紹與探討通信系統材料在不同環境下所衍生之腐蝕型態及其防治措施。

2. 實驗方法

2.1 大氣腐蝕試驗

線路設備中之架空電纜 (aerial cable) 多數均使用熱浸鍍鋅鋼材或鋼線作為支撐線，在海岸地區此種支撐線經由腐蝕作用在短時間即會產生斷裂情形。本實驗選擇在台灣不同氣候區建立大氣腐蝕試驗場，佈放包括：A(230g/m²)、B(488 g/m²)、C(732 g/m²) 三種不同鍍鋅量之熱浸鍍鋅鋼材、鍍鋁鋼材 (鍍鋁厚度0.18mm) 等不同之金屬材料。配合現場材質之取樣測試，試片放置在試驗架上與水

平成30度角，面向海的方向，試片經一定時間試驗後取回實驗室中，記錄其表面之變化^[1,2,3,4]，並測其電化學之腐蝕特性及其機械特性等變化，並利用EDS及ESCA分析其表面成份及腐蝕生成物。

2.2 硫害氣體腐蝕試驗

通信電子設備之金屬接點材質在高腐蝕性環境中常因腐蝕問題而影響其功能性、穩定度及可靠度等通訊特性。陽明山為硫害腐蝕極嚴重的地區，該地區之硫化氫平均濃度高達 102 ppb，二氧化硫平均濃度為 22 ppb。置於陽明山硫磺區之公話機內部之電路板及電子接點，即曾在 1-2 年內發生硫害腐蝕而產生功能性故障，另外此區域內之通信用箱體內其金屬端子之腐蝕情況亦相當普遍。硫害氣體腐蝕主要在探討置放於含高硫氮之大氣環境中，包括含有硫化氫與二氧化硫等氣體之環境時，不同之金屬端子接點 (connector) 其腐蝕特性。本節中使用鍍金 (1.0 μm 鍍金層/底材磷青銅)、鍍銀 (1.0 μm 鍍銀層/底材黃銅) 及鍍鎳 (1.0 μm 鍍鎳層/底材黃銅) 接點等三種不同鍍層材質，利用混合氣體腐蝕測試法及交流阻抗技術，探討在高溼度及低濃度二氧化硫 (SO₂) 及二氧化氮 (NO₂) 之接觸電阻及腐蝕特性。

2.3 陰極防蝕試驗

陰極防蝕法是腐蝕控制工程中極重要的防蝕保護方法，其基本理論乃藉外來電流使被保護金屬極化至不發生腐蝕的安全電位，又可分為利用外加電流法及犧牲陽極兩種不同方式。外加電流方式的陰極防蝕系統主要是利用外部電源來供應陰極(被保護體)與陽極之間所需要的電位差及DC電流，犧牲陽極方式則是利用電位較負(較活性)的金屬作為提供保護電流的陽極，再與被保護體焊接或經由導線聯接，形成一具備陽極與陰極的電化學反應電池。本節中主要係探討地下電纜其接續處之金屬接頭，若處在經常充滿地下污水、酸鹼之環境下，利用犧牲陽極材料進行陰極防蝕保護時之耐蝕特性，並探討不同之環境因子對其耐蝕性能之影響。地下電纜

接頭目前仍以使用鉛管為主。由於鉛在一般的大氣環境或水溶液中極為安定而不易腐蝕，因此鉛管接頭的正常使用壽命可達數十年之久。然而，置放鉛管接頭的地下人孔中，仍存有有可能加速鉛管腐蝕的複雜因素。

根據文獻^[5]，可能加速人孔鉛管腐蝕的因素主要包括下列五種：(1) 伽凡尼(Galvanic) 腐蝕效應。(2) 氧濃度差異 (Differential Aeration)。(3) 酸/鹼溶液效應。(4) 雜散電流 (Stray Current)。(5) 微生物腐蝕 (Bacterial Corrosion)：人孔中之硫酸還原菌 (sulfate-reducing bacteria, SRB) 吸收環境中的硫酸根離子及金屬還原反應產生的氫氣，發生代謝反應並產生強烈腐蝕性之硫化氫^[6]。陰極防蝕理論可用簡單的極化圖形，如圖2所示加以闡述^[7]。本實驗使用純鋅塊作為陰極防蝕用之犧牲陽極，其尺寸為 10 cm × 3.5 cm × 3.0 cm。先將鋅塊末端之陽極電流導線焊接於鉛管上，再以緊束帶 (cable tie) 固定導線與鋅塊即可完成模擬實驗用之陰極防蝕鉛管。模擬試驗方法乃是將對照組之裸鉛管與陰極防蝕鉛管共同置於水槽中，在不同的腐蝕液中進行電化學測試。

實驗所用之電化學儀器為恆電位儀 (Potentiostat, EG&G, M273A) 及所配合之頻率響應分析儀 (Frequency Response Analyzer, Schlumberger FRA1255)。使用之參考電極為飽和甘汞電極 (saturated calomel electrode, SCE)。交流阻抗測試頻率之變化方向乃由高頻往低頻掃描，頻率範圍為 100 kHz ~ 0.01 Hz，電位振幅為 10mV。裸鉛管的交流阻抗測試是在試樣的自然腐蝕電位 (E_{corr}) 下進行；然而在測試陰極保護鉛管交流阻抗時，須利用恆電位儀的定電位功能，將交流阻抗測試電位固定在鉛管與鋅犧牲陽極的耦合電位 (Coupling Potential, E_{cp}) 上，俟鋅犧牲陽極與鉛管分離去除後才進行測試，如此方能正確測出鉛管在陰極保護狀態下的腐蝕狀況。極化曲線測試乃先由陰極再向陽極進行，其電位掃描速率為 1mV/sec。模擬實驗所用之測試溶液依腐蝕性高低不同，依序為地下水、鹽水 (3% NaCl)、強酸溶液 (HCl, pH=1.2) 或強鹼溶液 (NaOH, pH=13)。

2.4 硫酸還原菌腐蝕試驗

硫酸還原菌廣泛存在於厭氧狀態下的污泥、下水道污水及海水中，當光纜在此環境中發生意外浸水，硫酸還原菌可能隨之進入光纜內繁殖。光纜之塑膠材料含有微生物生長所需之碳素源，再加上環境中的硝酸根(氮素源)、硫酸根及其他金屬無機成份，形成適合微生物繁殖之環境。微生物之代謝物常含有硫化氫等腐蝕性物質，造成光纜結構中金屬材料腐蝕及可能產生氫氣擴散進入光纖內部，造成光纜傳輸損失。其中以硫酸還原菌 (Sulfate Reducing Bacteria, SRB) 之腐蝕最常見^[8-16]。硫酸還原菌能將硫酸根還原成硫化氫，因此會產生去極化效應、改變金屬之腐蝕電位、微生物膜形成氧濃度電池效應加速金屬腐蝕、產生酸性代謝物並加速氫原子擴散進入光纖內部。本節實驗使用碳鋼、銅合金及鋁合金等材料，成份如表一所示。利用電信機房排水溝之污泥中篩選培養硫酸還原菌。培養液 (medium C) 組成為：(1) 硫酸亞鐵溶液，(2) 還原劑溶液，(3) 培養基：pH值7.2。試驗液分為兩組：(1) 對照組為培養液，不含硫酸還原菌；(2) 試驗組為含有硫酸還原菌之培養液。將金屬試片分別置入其中測其交流阻抗值之變化。

3. 結果與討論

3.1 大氣腐蝕試驗

經過7年之大氣腐蝕試驗結果顯示，在鹽份值較高的濱海試驗區，鍍鋁鋼材之耐蝕性明顯優於鍍鋅鋼材。鍍鋅量較小之A級鍍鋅鋼材其腐蝕速率，在鹽份高的地區具有最高之腐蝕速率，線材經過7年即已斷裂，B級與C級鍍鋅鋼材其機械強度降低 40%，鍍鋁鋼材降低 35%。利用 EDS 分析其表面成份，結果如表二。鍍鋅鋼材其腐蝕生成物包括 Zn, ZnO, ZnCl₂, Fe₂O₃, FeOOH, sulfate 等，鍍鋁鋼材之腐蝕生成物則包括 Al sulfate hydrate, Al(OH)₃, Al₂O₃·H₂O 等。利用線性多重回歸分析 (multi-regression analysis) 亦可找出金屬腐蝕速率與大氣腐蝕各項耐候因子間的關係式^[17]。由實驗結

果顯示，鍍鋁鋼材及具有較高鍍鋅量（或較厚鍍鋅層）之鋼材，使用在通信線路設備中作為架空電纜之支撐線為較佳之選擇。

3.2 硫害氣體腐蝕試驗

金屬接點在腐蝕性氣體中，表面腐蝕生成物隨時間而增加，接點重量亦隨之而增加，在混合氣體中接點之重量增加依序為：鍍鎳 > 鍍金 > 鍍銀。在單一氣體中接點之重量增加依序為：鍍鎳 > 鍍銀 > 鍍金，各接點重量增加值低於在混合氣體試驗時之增加值。接點在高溼度腐蝕性氣體中之耐蝕性可由電化學交流阻抗測試得知，其結果如圖3所示。阻抗值降低表示鍍層的腐蝕反應速率大，耐蝕性降低，由圖中可知在混合氣體中其阻抗值依序為：鍍銀 ≥ 鍍金 > 鍍鎳，在單一氣體中其阻抗值依序為：鍍金 > 鍍銀 > 鍍鎳。接點在腐蝕性氣體中因為表面生成物之增加，接觸電阻增大，如表三所示，由結果顯示鍍金與鍍銀接點劣化情形類似，兩者在混合氣體中之劣化情形比在單一氣體中嚴重，其腐蝕機制如圖4所示。

3.3 陰極防蝕試驗

依圖2所示，犧牲陽極其自然腐蝕開路電位必須遠低於被保護金屬的陽極反應平衡電位 E_a ，才可能使被保護金屬的電位被極化至 E_a 以下。以 25°C 水溶液之金屬陽極平衡反應 $M = M^{n+} + ne^-$ 而言，其平衡電位 E_a 之理論值如下^[7]：

$E_a = E_a^\circ + (RT/nF)\ln M^{n+}$ ， E_a° 為金屬基準電位(Standard Potential)；R 為氣體常數，T 為絕對溫度，F 為 Faraday 常數，在 25°C 之 $RT/F = 0.0257V$ (伏特)；n 為反應電子數， M^{n+} 為水溶液中之金屬離子濃度。計算出鉛管在室溫水溶液中的 E_a 值為 -0.545V (相對於飽和甘汞電極)。因此被陰極保護之鉛管的電位必須在 -0.545V 以下，才能達到完全防蝕的效果。圖5為鉛管在地下水、鹽水、強鹼及強酸等四種不同溶液中浸漬 100 小時之後的交流阻抗測試結果。圖中低頻區域的阻抗值代表可決定腐蝕速率的電荷轉移阻抗值 (Charge

Transfer Resistance)^[18-19]。圖6為裸鉛管與陰極保護鉛管在實驗室及現場人孔中的電位變化監測結果。由上結果可以發現，鋅犧牲陽極確實可發揮陰極保護之效果而將鉛管的電位極化至不腐蝕區。

3.4 硫酸還原菌腐蝕試驗

碳鋼、銅合金與鋁合金在兩種不同試驗液中之交流阻抗值，如圖7所示。由圖 7(a) 中可知碳鋼在含硫酸還原菌試驗液中之交流阻抗值降低，由極化測試計算其腐蝕速率分別為 27.5 $\mu A/cm^2$ (不含硫酸還原菌) 與 88.5 $\mu A/cm^2$ (含硫酸還原菌)。銅合金在含硫酸還原菌試驗經過30天即發生局部腐蝕現象，不含硫酸還原菌試驗中則無此現象。由圖7(c) 中可知在不含硫酸還原菌試驗中，鋁合金初期之交流阻抗值變化不明顯，95天後其阻抗值則明顯降低，而在含硫酸還原菌試驗中期阻抗值皆大幅降低，另由極化測試計算其腐蝕速率分別為 5.9 $\mu A/cm^2$ (不含硫酸還原菌) 與 27.7 $\mu A/cm^2$ (含硫酸還原菌)，推測其腐蝕機制應是表面形成之鈍態膜被破壞所致。

4. 結論

在電信通信用戶迴路系統之架構中，不論是戶外架空線路系統，地下管路系統，及屋內系統設備，如機房等，所使用之材料設備均會有腐蝕現象發生。針對既有之腐蝕現象所採取之防治措施，包括屋外使用鍍層較厚、較具耐蝕性之金屬材料或考慮使用耐候性佳之塗裝材料，地下管道使用犧牲陽極方式延長光電纜之使用壽命，屋內設備之電子接點其防治措施，則包括在硫害地區，改善機房空調設備或使用除硫裝置與監控設備等。

參考文獻

1. ASTM G50-76, "Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals".
2. ASTM G33-72, "Recording Data from Atmospheric Corrosion Tests of Metallic-Coated Steel Specimens".

3. T. S. Lee and K. L. Money, *Material Performance* (1984, Aug. 28) 28.
4. Sheldon W. Dean Jr., in: *Atmospheric Corrosion*, (1982) p.195.
5. J. F. Smith, *Materials Handbook, Corrosion*, 9th ed., ASM International, Ohio (1988).
6. J. William Costerton and J. Boivin, in: *Microbially Influenced Corrosion and Biodeterioration* (1990) p. 5.
7. H. H. Uhlig and R. W. Revie, in: *Corrosion and Corrosion Control*, 2nd ed., Chap.2, John Wiley & Sons, Inc., New York (1985).
8. P. F. Sanders and W. A. Hamilton, in: *Biologically Induced Corrosion*, NACE (1986) p. 47.
9. G. Eidsa and E. Risberg, *ibid*, p. 109.
10. R. A. King, B. S. Skerry, D. C. A. Moore, J. F. D. Stott, and L. Dawson, *ibid*, p. 83.
11. K. Kasahara and F. Kajiyana, *ibid*, p. 171.
12. O. C. Dias and M. C. Bromel, *Material Performance*, 29 (1990) 53.
13. K. G. Honneysett, W. D. Bergh, and P. F. Obrien, *Material Performance*, 24 (1985) 34.
14. R. Tatnall, A. Piluso, J. Stoecher, R. Schultz and G. Kobrin, *Material Performance*, 41 (1981) 41.
15. C. Ringas and F. P. A. Robinson, *Corrosion*, 44 (1988) pp. 671-678.
16. George Schick, *Telephony*, 28 (1992) 34.
17. Y. T. Horng, J. H. Wang, T. C. Chang, H. P. Hsu, Y. C. Lin, J. H. Lin, J. W. Hsu, and H. C. Shih, "Long-Term Atmospheric Corrosion Exposure of the Galvanized Steel and Aluminum-Coated Steel in Islands of Taiwan", *Mater. Perform.*, (March, 2003) pp. 32-36.
18. H. B. Sierra Alcazar, A. N. Fleming, and J. A. Harrison, *J. Electroanal. Chem.*, 87 (1978) 339.
19. J. E. B. Randles, *Dis. Faraday Soc.*, 1 (1947) 11.

收到日期：2004年10月27日

修訂日期：2005年7月1日

接受日期：2005年7月12日

表1. 硫酸還原菌腐蝕試驗金屬材料成份。

Table 1 Chemical compositions of materials of sulfate-reducing bacteria testing.

材料	Fe	C	Mn	Zn	Cu	Si	Mo	Cr	Ni	Al
碳鋼	bal	1.15	0.42	--	--	0.30	--	0.15	0.05	--
銅合金	--	--	--	--	35.82	--	--	--	0.05	--
鋁合金	0.46	--	--	--	0.36	0.64	--	0.01	1.06	bal

表2. 經過大氣腐蝕試驗後之金屬表面成份。

Table 2 Surface residual compositions of specimens after seven years' atmospheric exposure test by EDS analysis.

金屬種類	金屬表面成份					
	Zn	Fe	Al	Na	S	Cl
A 級鍍鋅鋼材	---	54.43	1.75	41.25	0.51	0.27
B 級鍍鋅鋼材	57.76	9.95	9.31	0.15	3.01	1.80
C 級鍍鋅鋼材	67.32	2.15	7.72	2.90	5.54	5.02
鍍鋁鋼材	---	1.68	66.6	0.30	9.33	20.56

表3. 不同金屬接點在二氧化與二氧化氮氣體中經過60小時之接觸電阻值。

Table 3 Contact resistance distribution(ΔR) of metal-plated connector contacts after exposure test for 60 h in SO_2 and in $SO_2 + NO_2$.

Contact \ Atmosphere	SO_2				$SO_2 + NO_2$			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Degradation class (%)								
Au	85	15	--	--	21	52	27	--
Ag	73	27	--	--	85	15	--	--
Ni	--	--	5	95	--	--	68	32

* Degradation class A: $\Delta R \leq 2 \text{ m}\Omega$ B: $2 < \Delta R \leq 10 \text{ m}\Omega$ C: $10 \text{ m}\Omega < \Delta R \leq 50 \text{ m}\Omega$ D: $\Delta R > 50 \text{ m}\Omega$

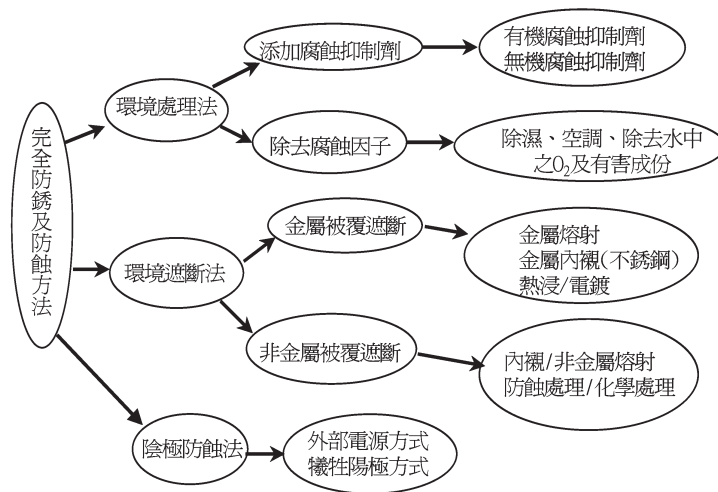


圖1 電信材料防蝕技術與方法。
Figure 1 Anti-corrosion methodology of telecommunication materials.

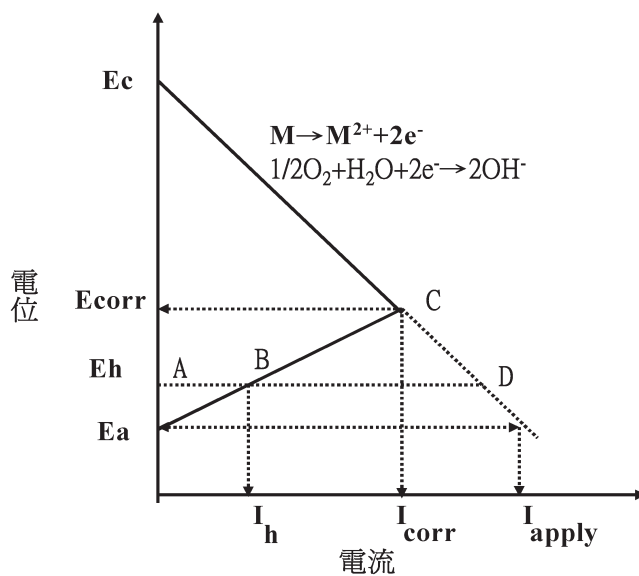


圖2 陰極防蝕原理之極化圖示。
Figure 2 The polarization diagram of cathodic protection. (M: metal to be protected; E_{corr} : Corrosion potential; I_{corr} : Corrosion current; I_{apply} : Applied current; E_a : Equilibrium potential)

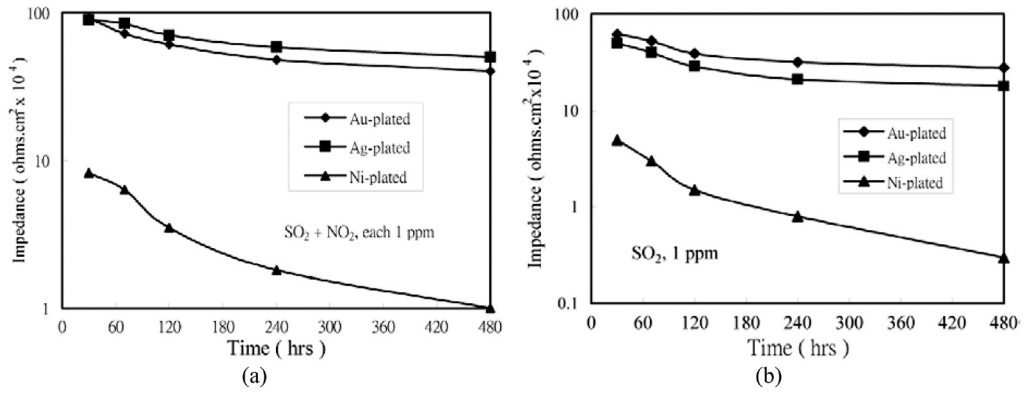


圖3 金屬接點在不同氣體中之阻抗變化 (a) SO₂ + NO₂; (b) SO₂。
 Figure 3 Variation in impedance with time after exposure test in (a) SO₂ + NO₂; and (b) SO₂ atmospheres.

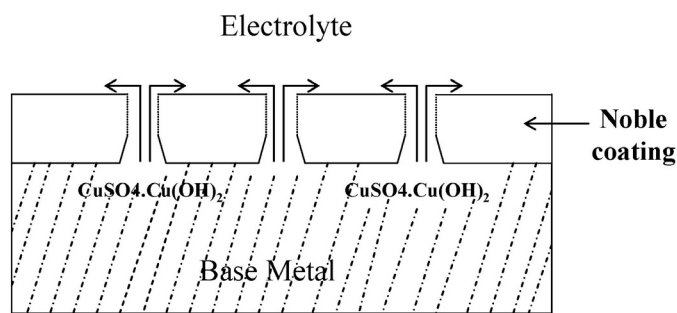


圖4 在 SO₂/NO₂ 氣體中金屬電子接點之腐蝕機制。
 Figure 4 Failure mechanism and sketch of current flow at defects of the electrical contacts in the SO₂ / NO₂ contaminated environments.

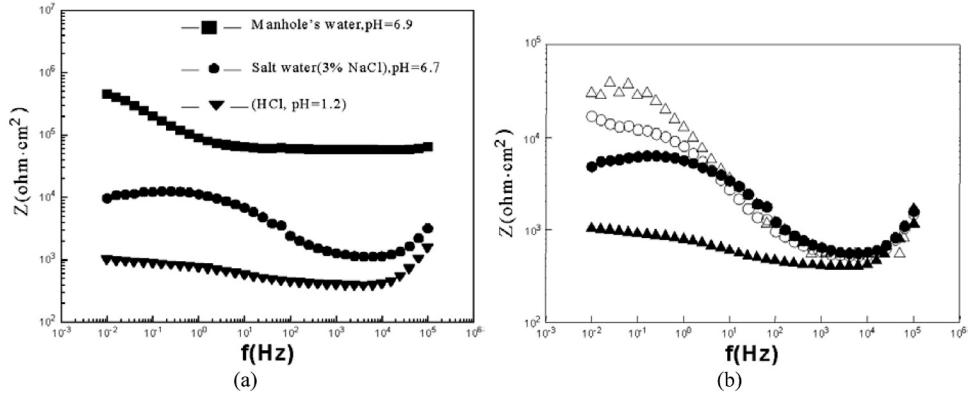


圖5 鉛管在有/無陰極保護作用下在不同腐蝕性溶液中的交流阻抗測試。
 Figure 5 EIS measurement of lead-sheathed cable. (a) without CP in the CHT manhole water and simulated severe environments. (b) with /without CP protection tested in salt water and in hydrochloric acid solution. ●: without CP in salty water, ○: with CP in salt water, ▲: without CP in HCl (aq), Δ: with CP in HCl_(aq).

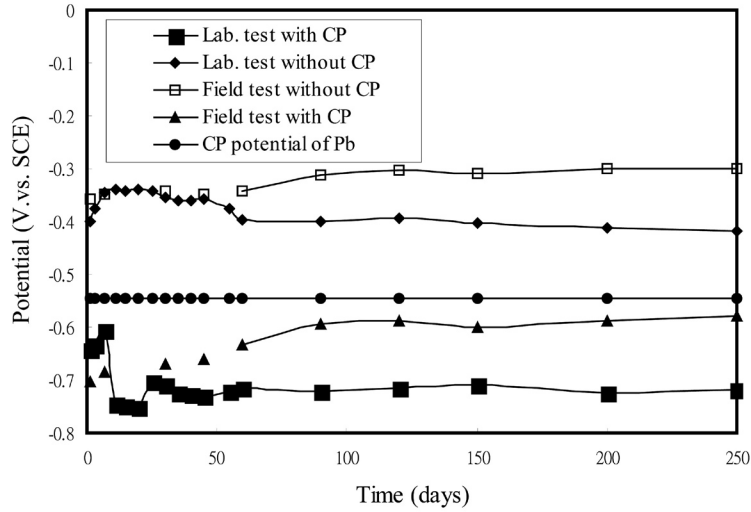
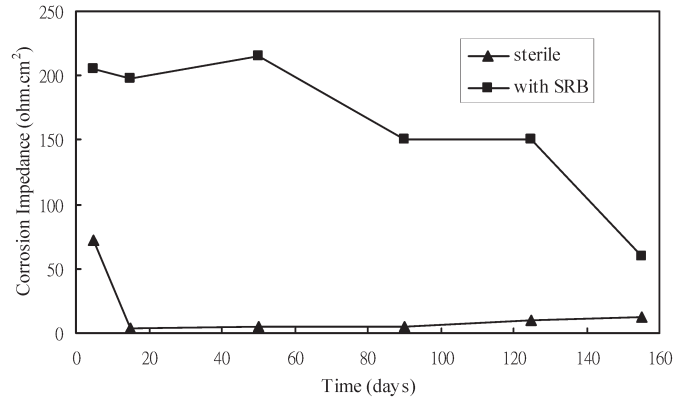
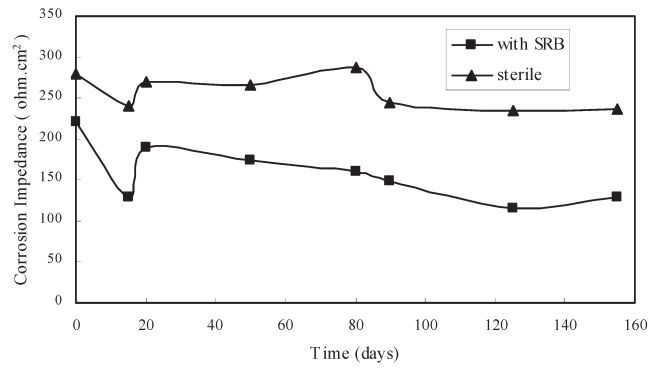


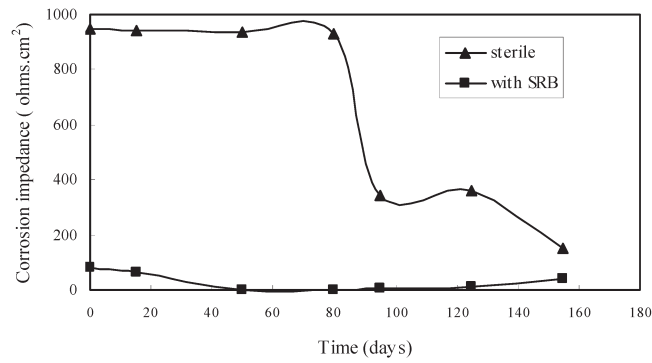
圖6 裸鉛管與陰極保護鉛管在地下水中之電位變化。
 Figure 6 Corrosion potential vs. time for the field test and laboratory test in the manhole water.



(a)



(b)



(c)

圖7 不同金屬在有無硫酸還原菌中之交流阻抗變化，(a) 碳鋼，(b) 銅合金，(c) 鋁合金。

Figure 7 Change in impedance of different metals vs. time with or without SRB. (a) Carbon steel, (b) Cu-alloy, (c) Al-alloy.