

交流電壓地下管線陰極防蝕引起的效應研究

王瑞坤

Effects of Alternating Current on Cathodic Protection of Underground Pipelines

Ruey-Kuen Wang

摘 要

交流電(AC)引起的腐蝕從 20 世紀的早期就已經被很多學者討論了，但是對地下管道的交流腐蝕作用，由於近代大容量 AC 高電壓供電線路和輸油輸氣管線需求急速增加，直到最近十幾年來才被證明。這篇文章嘗試分辨地下管道遭 AC 腐蝕的可能性。透過現場各種管線測量和實驗室試驗，證明 AC 電流可能造成現有陰極防蝕檢測數據的誤判；同時也證明，即使達到現有的陰極防蝕標準(NACE RP0169)，當管線表面發生交流電流密度大於 100 A/m²時，管線仍然會發生腐蝕的結論。

關鍵字：AC 腐蝕；交流感應電壓；管線腐蝕；陰極防蝕。

ABSTRACT

The phenomenon of alternating current (AC)-induced corrosion has been considered by many authors since the early 1900s, but the corrosive action of this current on the pipeline is not well known or well documented. This paper is an attempt to identify the possibility of AC corrosion for buried pipelines. By conducting various field and laboratory tests, AC currents may pose a threat to underground structures and cathodic protection (CP) requirements needed to mitigate the possible adverse AC current effects. However, even though CP criteria are matched, AC corrosion still takes place as AC currents is larger than 100 A/m².

Keywords: AC corrosion; Induced AC voltage; Pipeline corrosion; Cathodic protection.

1. 前言

長久以來對地下管線的防蝕問題，一般認為只要包覆良好再加上適當的陰極防蝕，就可克服所有的腐蝕干擾問題，因此地下管線一直依據 NACE RP-0169-85^[1]標準進行保護。但實際上有很多例子顯示，地下管線符合管對地電位 $E_{(p/s)} < -850$ mV (CSE) 之標準，但管線仍然發生腐蝕的情況。後來有人研究認為原來的 NACE RP-0169 標準包含 IR 降電位，不足以應付地下管線防蝕要求。因此 NACE 在 1992 年重新修定防蝕標準，將原來大家最常用的，管對地電位 $E_{(p/s)} < -850$ mV (CSE) 之標準剔除，而改用以 NACE RP-0169-2002^[2]極化電位 $E_{(p)} < -850$ mV (CSE) 的標準。但這個標準修改以後，管線腐蝕的問題並沒有完全解決，仍然有許多腐蝕的案例仍繼續發生，因此讓人懷疑尚有其他因素影響著陰極防蝕的效果。這十幾年來研究人員發現，以往常被忽視的 AC 電流扮演一個關鍵的因素，為了探討 AC 電壓(流)對地下管線陰極防蝕功能的影響，因此進行以下的研究。

2. 試驗目的

在許多地下管線符合標準但管線仍然發生腐蝕的例子，經過現場的調查發現，可能與 AC 供電系統有關，為了確認 AC 電流對地下金屬管線的影響，因此進行本實驗。實驗分成兩部分：一為無陰極防蝕下之純 AC 干擾試驗；另一實驗在良好的陰極防

表 1. 在負極被保護的鋼試片上，供應 AC 電壓 (60Hz)及對應的 AC 電流密度。

Table 1 The AC feeding voltages (60 Hz) and corresponding AC current densities applied on cathodic protected steel.

Specimen	AC Voltage (V)	AC current density (A/m ²)	DC potential (mV vs. SCE)
I	6.18	528	-1012
II	4.64	377	-1019
III	4.35	297	-1044
IV	3.51	220	-1019
V	2.01	121	-1032
VI	0.97	49	-1001
VII	0	0	-732~-749

蝕保護下之 AC 干擾試驗。

2.1 試驗設備與條件

試驗槽長、寬、高為 20 cm × 15 cm × 10 cm。試片材質為碳鋼(API 5LX X42)，尺寸 1.5 cm × 2.5 cm。參考電極為飽和甘汞電極(SCE)。試驗環境為顆粒大小接近之矽砂加入 3% NaCl 水溶液，其比電阻係數在 70 Ω.cm 至 205 Ω.cm。試驗電流密度如表 1。試驗時間 30 天。串聯電感(> 50H)的目的為了防止 AC 電流流入 DC 輔助試片(Ti)，確定 AC 電流只在試片 W1 與 W2 間流通。串聯電容(> 120 μF)的目的，為了防止 DC 流入試片(W2)，為了確保試片(W2)未受陰極保護。

2.2 AC 干擾試驗

- (1) 依照圖 1 連接試驗裝置。
- (2) 先以 DC 電源控制試片(W1)之極化電位(E_p)到達 -1000 mV (SCE)。此電位值比 NACE RP0169 之標準-850 mV (CSE)的保護效果還要好。
- (3) 極化電位(E_p)達穩定後，加上 AC 干擾電壓，AC 干擾電壓由可調式 AC 電源提供，調整各組試片之 AC 電壓達到如表 1 之試驗條件並固定之。

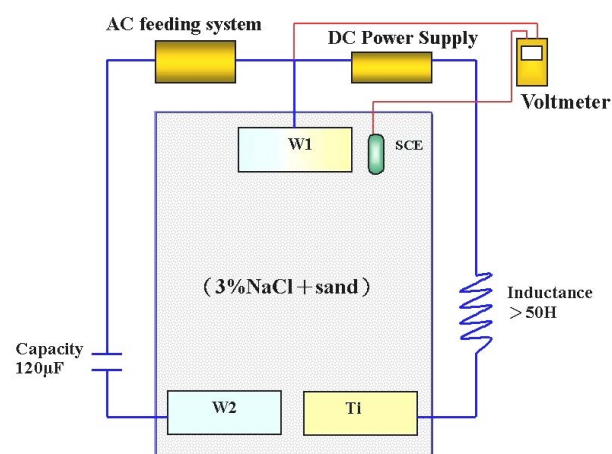


圖 1 陰極防蝕及未防蝕狀況下，不同 AC 感應腐蝕試驗裝置。

Figure 1 Experimental installation for tests on AC-induced corrosion under free exposed conditions and cathodic protection.

2.3 AC 電壓對管線陰極電位量測的影響試驗

由於在現場測試時發現，當管線有 AC 感應電壓干擾時，管線電位相當不穩定；明顯的可察覺到 AC 電壓對管線電位的量測有一定程度的影響。由於現場 AC、DC 電壓及環境因素都無法控制，因此只能在實驗室有效控制環境及變數下進行試驗分析。本試驗環境因素控制在單純的 3% NaCl 水溶液中，變數為試片 DC 電位及試片 AC 電壓。其中試片 DC 電位採用兩種不同的供電方式；A 為定電壓式：即固定整流器正負兩極間電壓，主要的目的是為了解試片(W1)在正常陰極防蝕保護下，不同 AC 電壓造成試片(W1)表面防蝕電位的變化情形；試片(W2)在無陰極防蝕保護下，不同 AC 電壓造成試片(W2)表面防蝕電位的變化情形。B 為定電位式：即試片(W)電位由定電位儀控制，主要的目的是探討試片(W)在控制相同的防蝕電位下，當試片表面有不同 AC 電壓時，藉由定電位儀偵測試片電流之流向及大小，來判斷不同 AC、DC 狀態下金屬腐蝕與否。

2.3.1 定電壓式(探討電位的變化)

- (1) 依照圖 1 連接試驗裝置。
- (2) 先控制陰極防蝕電位，由於自然電位約-550 mV (SCE)，因此由 DC 電源供應器控制試片電位為-700 mV，靜待試片-700 mV 電位穩定後記錄 DC 電位。
- (3) 開啓 AC 迴路電源，調整 AC 電流輸出，由電錶觀察試片 AC 感應電壓增至 200 mV，靜待試片電位穩定後記錄 DC 電位。
- (4) 繼續調整 AC 電流輸出，由電錶觀察試片 AC 感應電壓再增 200 mV(即 400 → 600 → 800 →)，靜待試片電位穩定後記錄 DC 電位。
- (5) 重複(4)步驟直到 AC 感應電壓至 3000 mV。
- (6) 調回 AC 電壓為 0V，關掉 AC 電源，靜待試片電位穩定。
- (7) 調整 DC 電源供應器控制試片極化電位增加-100 mV(即達到-800 mV)，靜待試片電位穩定後記錄 DC 電位。
- (8) 重複步驟(2)~(6)一直到 DC 電位-1300 mV。

2.3.2 定電位式(探討電流的變化)

- (1) 依照圖 2 連接試驗裝置後，測試各儀器設備是否正常，最重要的要確認 DC 迴路無 AC 電流，AC 迴路無 DC 電流。
- (2) 調整電錶可同時顯示 AC 及 DC 電位，若無法同時取得 AC 及 DC 電位，則必須並聯兩部電錶，一部電錶測 AC，另外一部電錶測 DC 電位。
- (3) 首先關閉 AC 電源。
- (4) 由恆電位儀設定試片電位為-700 mV，靜待試片-700 mV 電位穩定後記錄 DC 電流，必須特別注意正負號。
- (5) 繼續調整恆電位儀設定試片電位，增 50 mV(即 700 → 750 → 800 → 850→)靜待試片電位穩定後記錄 DC 電流。
- (6) 重複步驟(5)，直到 DC 電位達-1300 mV。
- (7) 關閉恆電位儀輸出。
- (8) 開啓 AC 迴路電源，調整 AC 電流輸出，由電錶觀察試片 AC 感應電壓增 200 mV(即 0 → 200 → 400 → 600 → 800 →)，靜待試片電位穩定後記錄 AC 電流及 AC 感應電壓。
- (9) 重複步驟(4)~(8)直到 AC 感應電壓至 3000 mV。

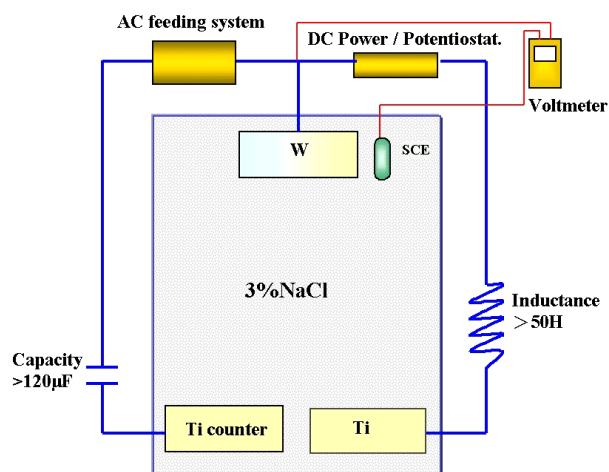


圖 2 不同 AC 感應電壓對陰極電流之影響試驗裝置。

Figure 2 Experimental installation for tests on specimen potential and current density measurement under various induced AC voltages.

3. 結果與討論

無 AC 干擾試片，試驗 30 天後之外觀如圖 3 所示。純 AC 電流腐蝕試驗結果後見圖 4。各個試片皆發生腐蝕且腐蝕型態為均勻腐蝕，電流密度愈大

腐蝕愈嚴重。CP + AC 腐蝕試驗後見圖 5，實驗結果確實當 AC 電流密度大於 100 A/m² 時，雖然陰極防蝕保護良好但仍然會發生腐蝕；而腐蝕型態為局部孔蝕。在無陰極防蝕或防蝕效果狀況差時，試片表

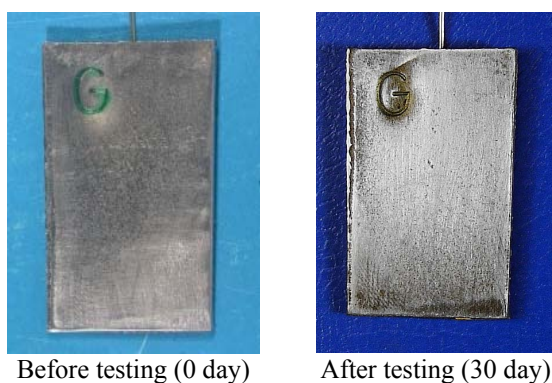


圖 3 無 AC 干擾試片，試驗 30 天後對照。

Figure 3 Free exposed steel without AC interference after 30 days of exposure.

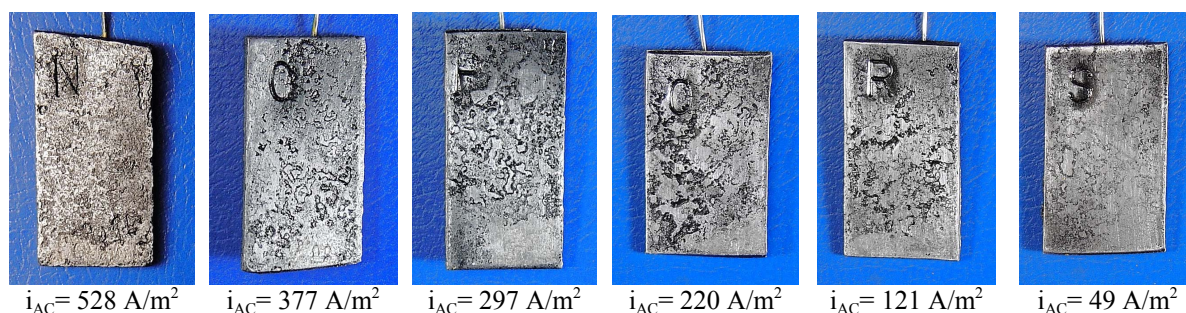


圖 4 無陰極保護試片在不同 AC 電流密度試驗，試驗 30 天後試片狀況。(i_{AC} : AC 電流密度)

Figure 4 Corrosion of free exposed steel under various AC induced current densities after 30 days of exposure. (i_{AC}: AC induced current density)

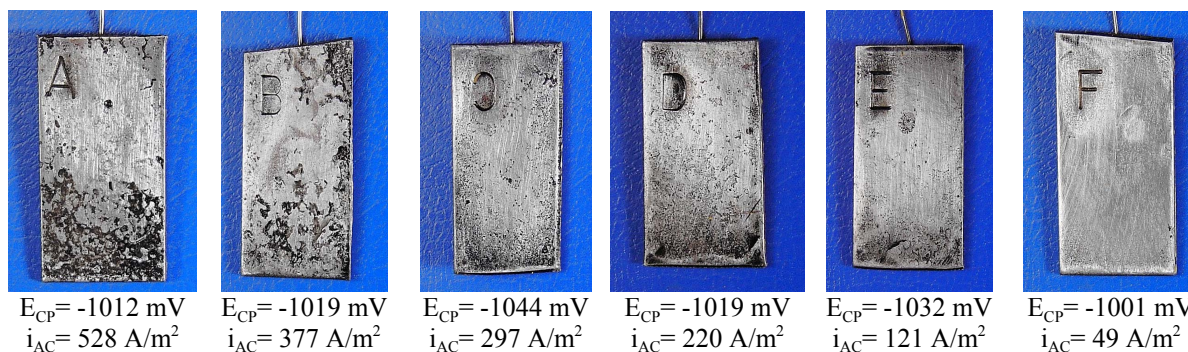


圖 5 相同在陰極防蝕保護下不同 AC 電流密度試驗，試驗 30 天後試片狀況。(E_{CP} : 試片電位(vs. SCE), i_{AC} : AC 電流密度)

Figure 5 Corrosion of cathodic protected steel under various AC induced current densities after 30 days of exposure. (E_{CP}: Specimen potential (vs. SCE), i_{AC}: AC current density)

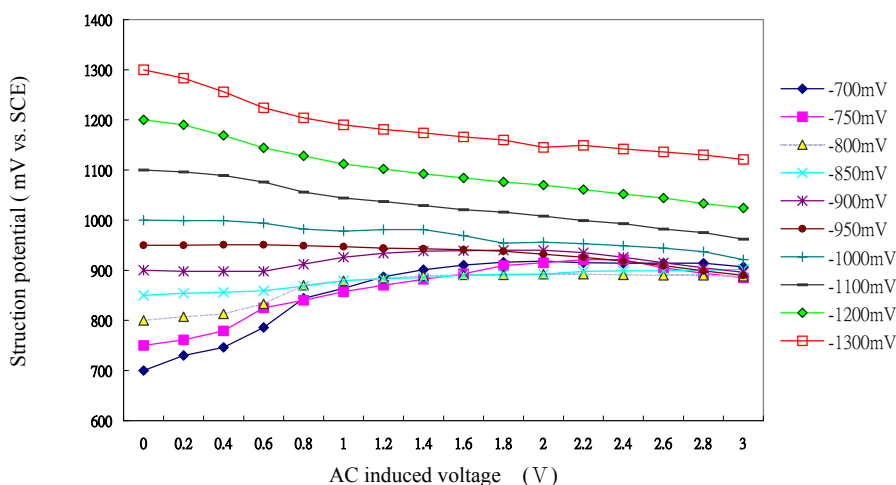


圖 6 在不同 AC 感應電壓下試片極化電位變化測量結果。

Figure 6 Specimen potentials measured from different polarized specimens under various AC voltages.

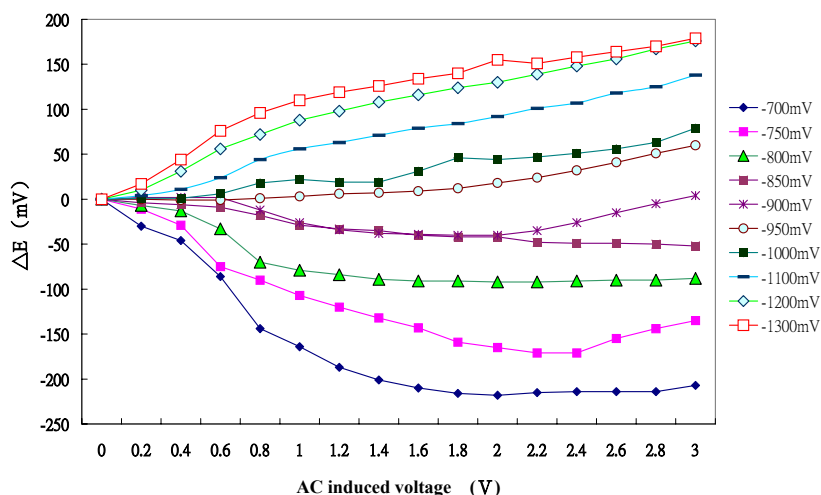


圖 7 試片電位的改變起因於交流電壓的增加。

Figure 7 Changes of potential measurement resulting from AC interference increase with increasing AC voltages.

面原本分成局部陽極與局部陰極，當有 AC 電流干擾時，交流電會加速陽極腐蝕速率，這是 AC 電流造成的『DC』腐蝕效應。另外 AC 電流密度若過大時，因 AC 電解腐蝕，這是 AC 電流造成的『AC』腐蝕效應；由於同時有 AC、DC 腐蝕因此在時為均勻腐蝕。陰極防蝕狀況良好時，試片表面只有陰極沒有陽極，當試片表面有 AC 電流干擾時，交流電不會造成『DC』腐蝕效應，但 AC 電流密度若過大時，陰極防蝕卻無法抑制 AC 電流。由於 AC 電流走試片表面阻抗相對較低的區域，形成局部區域只有 AC 電流進出(腐蝕)，而其他區域為陰極防蝕電流

進入(不腐蝕)的狀況，所以造成局部孔蝕。這一個結果證明陰極防蝕無法完全抑制 AC 腐蝕的發生。

以定電壓方式的陰極防蝕保護系統，當有不同程度的 AC 干擾時，陰極電位變化結果如圖 6。若以 AC 感應電壓為 X 軸，以陰極電位改變量(與無 AC 電壓時比較)為 Y 軸畫成曲線圖 7，從圖上很明顯的發現，當陰極防蝕狀況較好時(防蝕電位較-950 mV 更負)受到 AC 干擾時，電位往較正的方向移動，且 AC 電壓愈大愈嚴重。但陰極防蝕狀況較差(防蝕電位較-950 mV 為正)受到 AC 干擾時，電位卻往較負的方向移動。AC 感應電壓會改變管線電位，影響陰

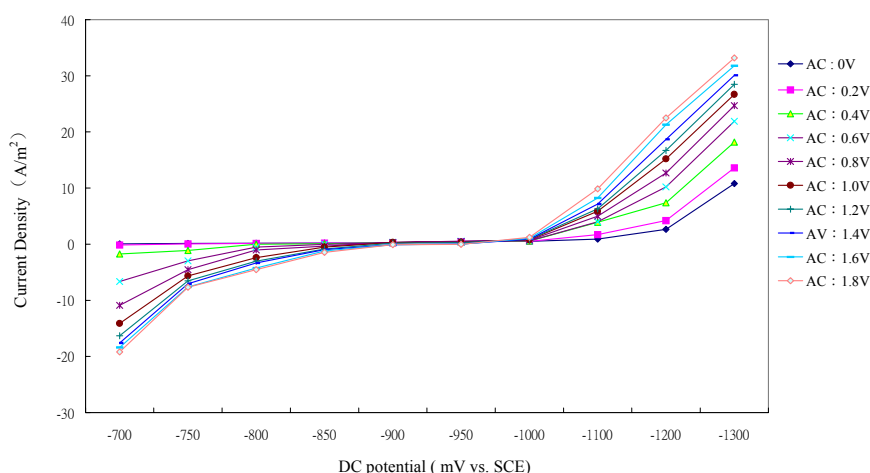


圖 8 交流電壓的改變導致鋼試片表面 DC 電流密度及流向的變化。

Figure 8 Plots of net DC current densities of polarized steels under various induced AC voltages.

表 2. 不同 AC 壓時，由定電位儀測到鋼試片之淨 DC 電流大小。

Table 2 Net DC current densities of polarized steels measured by a potentiostat at different AC voltages.

Applied AC Voltages (V)	Polarized potential(mV vs SCE)and resulting net DC current Density(mA/m²)									
	-700	-750	-800	-850	-900	-950	-1000	-1100	-1200	-1300
0	93	200	253	280	320	640	680	1240	3547	14400
0.2	-169	60	213	280	320	613	693	2293	5627	18133
0.4	-2320	-1493	-13	117	360	613	747	5200	9867	24267
0.6	-8867	-3920	-693	-53	427	733	827	5333	13600	29200
0.8	-14533	-6040	-1347	-467	413	667	960	6667	16933	32933
1	-18800	-7507	-3187	-653	440	467	1067	7853	20267	35600
1.2	-21733	-8680	-4013	-1133	280	387	1200	8413	22267	38000
1.4	-23467	-9387	-4467	-1267	-93	27	1253	9547	24933	40133
1.6	-24533	-10133	-5667	-1600	-93	-13	1413	11000	28400	42400
1.8	-25600	-10227	-6040	-1933	-107	-27	1640	13160	30000	44267
2	-26133	-11053	-6987	-2013	-107	-31	1867	15067	32800	46800
2.2	-26267	-11653	-7147	-2147	-107	-27	2027	17200	36533	50267
2.4	-26800	-12480	-7413	-2227	-107	-27	2067	19600	39733	52533
2.6	-27067	-13053	-8000	-2427	-93	-21	2400	22000	41867	54933
2.8	-27467	-13147	-8027	-2653	-80	-17	2533	24400	45467	58667
3	-27867	-13333	-8667	-2693	-67	0	2840	27600	50027	62400

極防蝕效果的判斷，增加腐蝕的危險。較高的 AC 電流密度對地下管線而言，則破壞金屬表面部分保護膜，造成局部的 AC 孔蝕的發生，這樣的理論在 1995 及 1998 年由 S.B lalvani^[3]與 R.W.bosch 提出^[4]，經過以上的實驗更得到確認。由實驗的結果推測，現場可能會發生不同測試點，但因不同陰極防蝕程度、AC 電壓干擾及土壤環境的組合，而量到同樣的管線電位值，但它可能得到不同的結果。一種可能

保護良好，但另一種狀況則會發生腐蝕。若以目前的陰極防蝕標準(NACE RP-0169-2002)是無法分辨的。

以定電位方式保護試片，當有不同程度的 AC 干擾時，試片表面 DC 電流變化結果如表 2。由表 2 分析，以防蝕電位為 X 軸，以試片表面 DC 電流為 Y 軸；畫成圖 8 曲線圖，從圖上很明顯的發現從 X 軸-950 mV，區分為左右二個區域，左邊陽極反應大

於陰極反應區。右邊陰極反應大於陽極反應區。電流為負值時表示電流從試片流至溶液中，即為 AC 電流造成的陽極反應增加效應大於陰極保護效果；正值為電流從溶液流入試片，即為陰極防蝕效果完全壓制因 AC 電流造成的陽極反應增加效應。

由於地下管線 AC 干擾相當普遍，同時也確定 AC 會造成腐蝕，同時已經有人提出以 AC、DC 電流密度為主軸的腐蝕關係圖^{5、6}，即以的『新陰極防蝕標準』，替代原有 poubaix(E-pH)舊式陰極防蝕標準，來減低 AC 腐蝕風險的方法；因此也呼籲相關單位確實應該重視 AC 腐蝕問題，重新檢討陰極防蝕檢測方法及保護標準。

從國際論文⁷⁻¹⁰的報告及實驗結果發現，地下管線 AC 電壓達 2V 以上，就可能產生 100 A/m² 之 AC 電流，由於未考慮 AC 腐蝕問題，因此不少論文提到 NACE RP0177¹¹標準有提出修定的必要，我們也認為有重新檢討的必要。

4. 結論

1. 地下管線中的 AC 電壓：會造成管線電位的移動，在陰極防蝕良好時電位往正方向偏移。在陰極防蝕不良或無陰極防蝕時，電位往負方向偏移，增加防蝕效果良好的假象，影響陰極防蝕效果的判斷。
2. 地下管線中的 AC 電流：在陰極防蝕良好時，當 AC 電流大於 100 A/m²，會發生 AC 腐蝕。當地下管線陰極防蝕不良或雜散電流干擾時，AC 電流會加速陽極腐蝕速率。

參考資料

1. NACE Standard RP0169-85, "Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems", NACE International, Houston, Texas, 1985.
2. NACE Standard RP0169-2002, "Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems", NACE International, Houston, Texas, 2002.

3. S. B. Lalvani, "The corrosion of carbon steel in a chloride environment due to periodic voltage modulation – part 1, part 2", Corrosion Science, 37 (1995) pp. 1567-1582.
4. R. W. Bosch, "A theoretical study of ac-induced corrosion considering diffusion phenomena", Corrosion Science, 40 (1998) pp. 323-336.
5. Yuji Hosokawa, "New CP criteria for elimination of the risks of ac corrosion and overprotection on cathodically protected pipelines", Corrosion/2002 NACE International Conference, Paper No.111.
6. Yuji Hosokawa, "New CP maintenance concept for buried steel pipelines", Corrosion/2004 NACE International Conference, Paper No. 047.
7. R. G. Wakelin, "AC corrosion-case histories, test procedures, mitigation", Corrosion/1998 NACE International Conference, Paper No. 565.
8. Roger Floyd, "Testing and mitigation of ac corrosion on 8" line: a field study", Corrosion/2004 NACE International Conference, Paper No. 210.
9. H. R. Hanson and Jack Smart, "AC corrosion on a pipeline located in an Hvac utility corridor", Corrosion/2004 NACE International Conference, Paper No. 209.
10. Robert G. Wakelin, P.Eng., and Christopher Sheldon, "Investigation and mitigation of AC corrosion on a 300 mm diameter natural gas pipeline", Corrosion/2004 NACE International Conference, Paper No. 205.
11. NACE Standard RP0177-95, "Mitigation of alternating current and lightning effects on metallic structures and corrosion control systems", NACE International, Houston, Texas, 1995.

收到日期：2005 年 8 月 25 日

修訂日期：2006 年 1 月 6 日

接受日期：2006 年 1 月 19 日

