

地下管線 AC 腐蝕與防治回顧

王瑞坤

A Review of AC Corrosion of Underground Pipeline

Ruey-Kuen Wang

摘 要

Kubn 在 1928 年第一次使用陰極防蝕保護地下管線，至今對於地下管線 DC 腐蝕的防治技術發展得相當完備。但是地下管線的 AC 腐蝕作用，直到 1986 年德國一條 PE 包覆管線發生兩處腐蝕孔，最後被正式確認為一條交流運輸系統所造成的 AC 腐蝕；因此 AC 腐蝕的問題才逐漸被重視，國外已有新的理論與防治方法被提出。AC 腐蝕損害對國內管線業者相當陌生，因此這篇文章提醒管線業者，當管線遭受到 AC 干擾時，傳統的陰極防蝕系統可能會受到影響，因此必須同時解決 AC 干擾問題才能有效地保障管線的安全。

關鍵字：AC 腐蝕；陰極防蝕；地下管線；AC 電力輸送線路。

ABSTRACT

In 1928, Kubn started using cathodic protection to prevent underground pipelines from corrosion. To date, corrosion control for underground pipelines induced by DC current has been well developed. However, AC corrosion had not been taken into account until two pitting corrosion of a PE coated pipeline were found in Germany 1986. It was proven that an AC transportation system created AC corrosion in forms of pitting on the underground pipeline. Consequently, intensive studies on the corrosivity of AC current on buried structures grew up in the recent years. Even though theories and corrosion control methods for AC corrosion have been proposed in the several researches, lack of knowledge in this field is still present in Taiwan industries. This paper is an attempt to inform the Taiwan pipeline community that AC corrosion on underground pipelines is quite universal also serious. The traditional cathodic protection technology will not control AC corrosion to acceptable levels so that it must simultaneously solve AC corrosion problems to maintain the pipeline integrity.

Keywords: AC corrosion; Cathodic protection; Underground pipeline; AC power line.

1. 前言

交流電引起的腐蝕從 20 世紀的早期就已經被很多學者討論了，但許多問題仍有待釐清，以交流腐蝕的機理而言，至今還沒定論；有去膜理論、整流理論及電化學理論^[1]，這些理論都有待今後的研究工作中加以證實和完善。早期對於交流電的腐蝕作用，所提出的基本觀點：一、交流電流將加速金屬陽極腐蝕；二、對於鋼鐵交流腐蝕效率相當於直流腐蝕的 1 ~ 2% 左右^[2,3]；三、陰極防蝕可以抑制交流電腐蝕。這些觀念經過最近的研究結果證明不完全正確，但由於舊觀念根深柢固，加上早期高壓電力輸配系統尚未蓬勃發展，地下管線因 AC 感應所造成的 AC 電流僅與 DC 雜散電流相當，因此認為地下管線只要陰極防蝕發揮正常功能，就可克服所有的腐蝕干擾問題。由於近代大容量的 AC 高電壓供電系統和輸油輸氣管線需求急速增加，而且它們常建造在一起，它們之間沒有足夠的安全距離；同時又因管線包覆技術不斷提升，如聚乙烯(PE)那樣高阻抗材料的使用；種種原因都迅速造成管線 AC 感應電壓的增加；目前已有許多文獻^[4,5]證明 AC 確實會造成管線不良的影響。

2. 探討目標

第一次懷疑 AC 在管道上引起腐蝕的報告是在 1955 年，在一次 AGA(American Gas Association)腐蝕調查委員會提出，當時共有 27 個案例，其中有 7 個懷疑是 AC 引起的管道腐蝕，但最後都未能確認為 AC 腐蝕，因此往後三十幾年仍延用舊有的防蝕方式。直到 1986 年在德國，一條聚乙烯地下鋼管發現兩處腐蝕異常點，雖然管線當時陰極防蝕電位達 -1000 mV(CSE)，但經過調查正式確認它是由一條交流(15KV、16Hz)交通運輸系統所造成的 AC 腐蝕。之後相繼有幾個交流腐蝕的案例在法國被發現^[4]，當時陰極防蝕電位達 -2000 mV ~ -2500 mV(CSE)；同時在北美洲也有 5 個案例發生^[5]，僅管當時的陰極防蝕電位也都達到所謂的防蝕標準以上；相似的結論也在日本被證實^[6]。因此地下管線 AC 腐蝕的問題逐漸被重視，每年都會有 AC 電流與地下管線腐蝕相關的問題論文發表。就以歷年來在 NACE 研討會所發表的論文(見表 1)統計，從論文發表的數量及

發表國家分析，可以發現世界各先進國家對 AC 腐蝕的問題都相當重視，甚至近年 NACE 還特別針對『AC 干擾問題』設計訓練課程，提醒大家對 AC 干擾的重視。若從這些論文的內容大約可將其歸納成三大類：一、AC 腐蝕原理探討。二、實驗與驗證。三、AC 腐蝕案例；它們之間的關係如圖 1，它們最終的目的都是要找出解決 AC 腐蝕的對策。以下章節將對這三大主題分析。

3. AC 腐蝕原理探討

交流腐蝕的機理，雖然至今還沒有定論，但基本上還是可以從腐蝕電化學理論加以解釋。個人認為寫得最完整未過於 R.W.bosch and W.F.BOGAERNT 在 1998 年發表於 Corrosion Science "A theoretical study of AC-induced corrosion considering diffusion phenomnt"這篇文章^[7]。它將 AC 感應電壓對腐蝕行為的影響區分為兩種情況：第一種陽極和陰極反應在活性反應下控制。第二種情況則陽極反應是在活性反應下控制，而陰極反應是在混合反應(擴散+活性)下控制。基本上 AC 感應電壓與腐蝕電位和腐蝕電流的關係仍是一個簡單的腐蝕反應過程包括陽極反應和陰極反應，這個程式包含著電流與電位的關係式：

$$i = i_{\text{corr}} [\exp(\tilde{\eta}/\beta_a) - \exp(\tilde{\eta}/\beta_c)] \quad (1)$$

式中

i ：總反應電流密度；

i_{corr} ：腐蝕電流密度；

$\tilde{\eta}$ ：過電壓(overpotential)包含 AC、DC；

β_a ：陽極鐵弗(Tafel)常數；

β_c ：陰極鐵弗(Tafel)常數。

當只有 DC 電流時， η 為 DC 過電壓。當系統中有 AC 電壓時， U 為 AC 電壓， ω 為角頻率(rad/s)。則過電壓可寫成： $\tilde{\eta} = \eta + U \sin(\omega t)$

將其代入式，再利用 Bessel function 解得

$$i = i_{\text{corr}} [\exp(\eta/\beta_a) I_0(U/\beta_a) - \exp(\eta/\beta_c) I_0(U/\beta_c)] \quad (2)$$

這一個方程式說明 AC 感應電壓會造成的腐蝕電位變化，當固定 i_{corr} 。將 β_a 、 β_c 代入不同 AC 感應

地下管線 AC 腐蝕發展回顧

表 1. 地下管線 AC 腐蝕論文發表於 CORROSION/NACE 整理。

Table 1 Statistics of AC corrosion papers on underground pipelines published in COORSION/NACE.

年份	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
篇數	2	1	5	1	0	3	2	7	9
編號	論文編號	作者	論文名稱						
1	1996-191	John Dabkowski	A statistical approach to designing mitigation for induced ac voltages						
2	1996-210	Marvin J. Frazier, Thomas J. Barlo	Influence of ac from power lines on the cathodic protection of steel in groundwater solutions						
3	1997-569	Stuart L. Engle	Mitigation of ac interference on a water transmission pipeline system						
4	1998-561	John Dabkowski	A review of ac power line coupling unto buried pipelines						
5	1998-564	R. D. Southey, F. P. Dawalibi	Computer modelling of ac interference problems for the most cost-effective solutions						
6	1998-565	R. G. Wakelin, R.A. Gummow	Ac corrosion -case histories,test procedures,& mitigation						
7	1998-563	Daniel L. Caudill, Kevinc. Garrity	An investigation of ac interference related explosions of underground industrial gas piping						
8	1998-566	R.A. Gummow, R.G. Wakelin, S. M. Segall	Ac corrosion - a new challenge to pipeline integrity						
9	1999-223	D.S. Dunn, M.B. Bogart	Corrosion of iron under alternating wet and dry conditions						
10	2001-601	John Dabkowski, Robert F. Allen	Mitigation design, installation and post commissioning measurements for a pipeline collocated with ac transmission lines						
11	2001-604	Robert D. Southey, Winston Ruan	Ac mitigation requirements: a parametric analysis						
12	2001-600	Robert F. Allen	Test methods and monitoring of interference and cathodic protection of pipelines in joint facility corridors						
13	2002-112	Yuji Hosokawa, Fumio Kajiyama	An innovative instrument for evaluating cp levels liaison with enhanced cp maintenance database						
14	2002-117	Hongseok Song, Younggeun Kim	Competition of ac and dc current in ac corrosion under cathodic protection						
15	2003-704	F. Bolzoni, S. Goidanich	Laboratory test results of ac interference on polarized steel						
16	2003-707	Kirkpatrick	Retrofit induced ac mitigation earl						
17	2003-709	Michael H. Tachick	Common misconceptions regarding decoupled grounding systems when mitigating induced ac voltages on pipelines						
18	2003-699	Douglas E. Gilroy	Ac interference - important issues for cross country pipelines						
19	2003-703	J. Dabkowski	Methodologies for ac mitigation						
20	2003-708	R. D. Southey, W. Ruan, F. P. Dawalibi	Estimating ac mitigation requirements for pipelines installed in high voltage ac corridors						
21	2003-443	L.V. Nielsen K.V. Nielsen	Differential er-technology for measuring degree of accumulated corrosion as well as instant corrosion rate						
22	2004-205	Robert G. Wakelin, P.Eng.Christopher	Investigation and mitigation of ac corrosion on a 300 mm diameter natural gas pipeline						
23	2004-209	H. R. Hanson, Jack Smart	Ac corrosion on a pipeline located in an Hvac utility corridor						
24	2004-208	F. Bolzoni, S. Goidanich	Laboratory testing on the influence of alternated current on steel corrosion						
25	2004-206	Mark Yunovich, Neil G. Thompson	Ac corrosion rate and mitigation requirements						
26	2004-210	Roger Floyd	Testing and mitigation of ac corrosion on 8" line: a field study						
27	200420047	Yuji Hosokawa, Fumio Kajiyama	New cp maintenance concept for buried steel pipelines						
28	2004-212	L. Trichtchenko	Modeling electromagnetic induction in pipelines						
29	2004-211	L.V. Nielsen, K.V. Nielsen	Ac-induced corrosion in pipelines: Detection, characterisation, and mitigation						
30	2004-213	Y. Li, F. P. Dawalibi	Effects of current unbalance and transmission line configuration on the Interference levels induced on nearby pipelines						

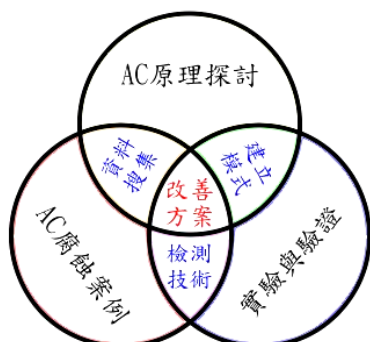


圖 1 AC 腐蝕研究領域分析。

Figure 1 Research Domains of AC corrosion.

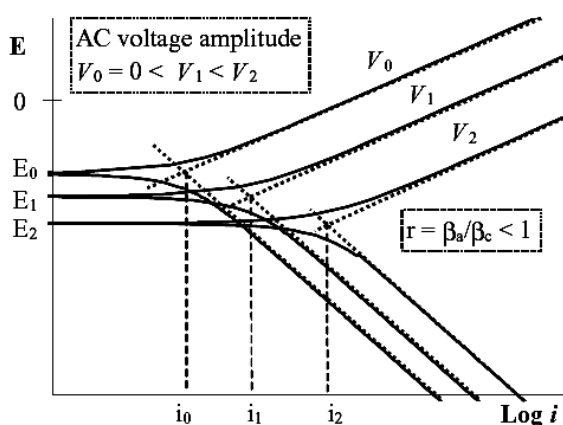


圖 2 陽極反應速率大於陰極反應速率之 AC 干擾極化曲線圖。

Figure 2 Effects of alternating voltage on Tafel plots expected by the theoretical models reported : when $r = \beta_a/\beta_c < 1$.

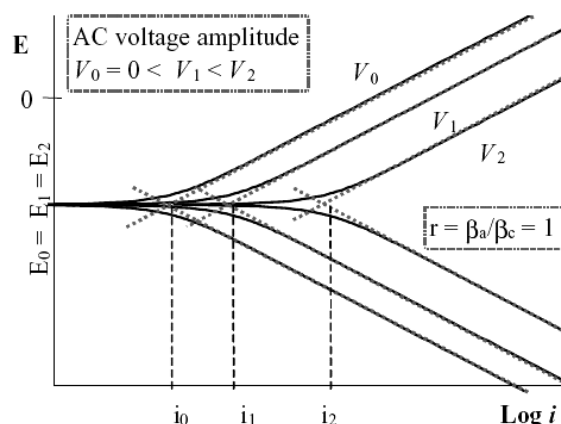


圖 3 陽極反應速率等於陰極反應速率之 AC 干擾極化曲線圖。

Figure 3 Effects of alternating voltage on Tafel plots expected by the theoretical models reported : when $r = \beta_a/\beta_c$.

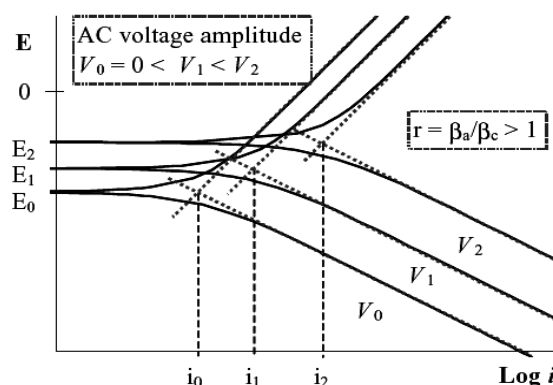


圖 4 陰極反應速率大於陽極反應速率之 AC 干擾極化曲線圖。

Figure 4 Effects of alternating voltage on Tafel plots expected by the theoretical models reported: when $r = \beta_a/\beta_c > 1$.

電(U)值後，經數值分析可以解出不同 AC 感應干擾之極化曲線圖(圖 2、圖 3、圖 4)，從三張圖說明 AC 電壓可能造成腐蝕電位往正方向改變，也可能造成腐蝕電位往負方向改變。

當反應有 AC 感應電壓時，腐蝕電位將因此產生變化，即新的過電壓 $\eta = \Delta E_{corr}$ 。

$$\Delta E_{corr} = [\beta_a \beta_c / (\beta_a + \beta_c)] \cdot \{ \ln [I_0 \cdot (-U/\beta_c)] - \ln [I_0 \cdot (U/\beta_a)] \} \quad (3)$$

若更進一步若代入更多參數，則可畫出 ΔE_{corr}

對 AC 感應電壓之關係圖(圖 5)。

當 $i_{corr}(U)$ 是因 AC 感應電壓造成的腐蝕電流時，得到下式：

$$i_{corr}(U) = i_{corr} \{ I_0 (U/\beta_a)^{[\beta_a/(\beta_a + \beta_c)]} I_0 (U/\beta_c)^{[\beta_c/(\beta_a + \beta_c)]} \} \quad (4)$$

這一個方程式說明 AC 感應電壓會造成的腐蝕速率的改變，代入參數則可得 Δi_{corr} 對 AC 感應電壓

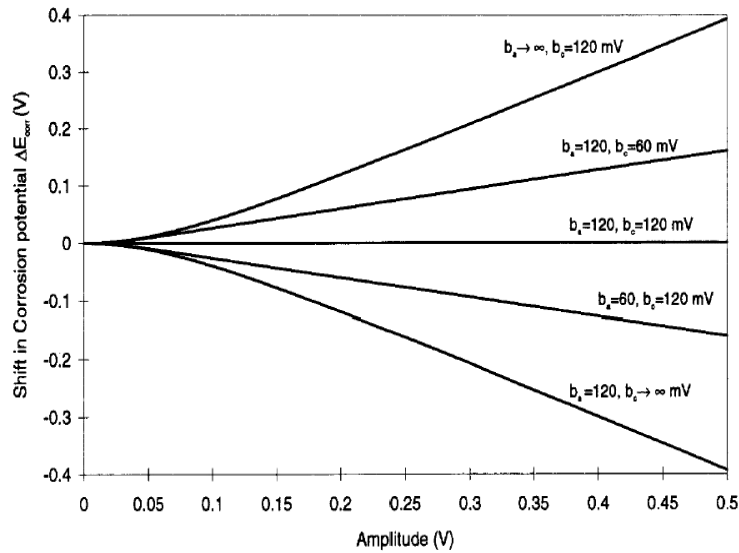


圖 5 AC 感應電壓造成腐蝕電位改變關係圖。

Figure 5 Dependency of corrosion potential on the AC- voltage amplitude for different Tafel parameter combinations.

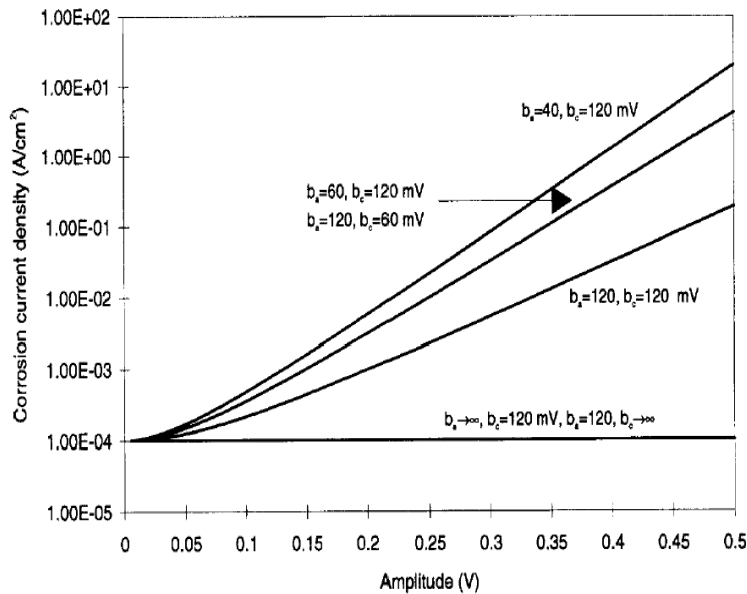


圖 6 AC 感應電壓造成的腐蝕電流增加關係圖。

Figure 6 Dependency of corrosion rate on the AC- voltage amplitude for different Tafel parameter combinations.

之關係圖(圖 6)，這一個式子清楚地說明 AC 感應電壓造成腐蝕速率的增加。

4. AC 腐蝕案例分析

長久以來地下管線的防蝕問題，一般認為只要管線包覆良好再加上適當的陰極防蝕保護，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-01-69-82^[8]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 RP0169- 82 標準包含 IR 降電位，不足以應付地下管線防蝕要求。因此



包覆材質柏油之腐蝕孔型態

包覆材質 PE 之腐蝕孔型態

圖 7 不同包覆材料造成不同型態腐蝕孔。

Figure 7 Different coating materials accompanied with different types of corrosion damage.

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 $E_{(p/s)} < -850 \text{ mV(CSE)}$ 」之標準剔除，而改用極化電位 $E_{(p)} < -850 \text{ mV(CSE)}$ 為標準^[9]。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^[10]，因此讓人懷疑尚有其他因素影響著陰極防蝕的效果。經過分析發現這些破損案例(見表 2)有一些共同

的特點，都與高壓電力系統平行同時感應不同程度的 AC 電壓在管線上。腐蝕的形態都是局部腐蝕，管線包覆若為 PE 材質，則腐蝕孔較接近圓形(圖 7 上)，管線包覆為柏油材質，腐蝕孔較屬不規則但邊緣平滑之形狀(圖 7 下)。再利用輔助電極法(coupons)測量破管處之管線泄漏電流密度及 AC 電壓，發現這些地方的 AC 電流密度都很大。甚至有些現場測

表 2. AC 腐蝕破損案例分析。

Table 2 Failure cases of AC corrosion on Underground Pipelines.

發生年代	所在國家	陰極防蝕電位(mV)	破損管徑(mm)	AC 感應電壓(V)	土壤比電阻($\Omega \cdot \text{cm}$)	AC 電流(A/cm^2)
1976	加拿大	-1270 ~ -1470	250	12~15	300	200
1991	加拿大	-1450 ~ -1500	300	28	1000	1100
1994	加拿大	-1050 ~ -1490	500	25	2000	84
1993	法國	-2000 ~ -2500	100	13~16	340	450
2000	美國	符合標準	220	80	10000	1000
2002	法國	-1350	300	50	10000	100
2002	北美洲	-1080 ~ -1170	300	50	1600	800

試發現當 AC 電壓達 5V，就可能產生 100 A/m² 之 AC 電流。此電流密度雖然僅僅是近似地模擬管線泄漏情況，不能完全反映這個過程，但仍然可以確認高密度 AC 電流會造成管線不良的影響。

5. 新觀念與新方法

在早期對於地下管線 AC 干擾的問題，由於以往的觀念認為陰極防蝕可以抑制交流電腐蝕，因此僅重視 AC 感應電壓所造成的人身傷害，AC 干擾的檢測也著重於 AC 感應電壓的量測。但經過許多的實驗結果證明，在無陰極保護的情況下，確定 AC 電流會造成管線嚴重的腐蝕。在 AC 電流密度低於 75 A/m² ~ 100 A/m² 情況下，增加陰極防蝕的極化量可以抑制 AC 腐蝕。但 AC 電流密度大於 100 A/m² 以上時，就算最佳的陰極防蝕保護仍然會發生 AC 腐蝕。由於地下管線 AC 干擾相當普遍，因此有人提出以 AC、DC current density 腐蝕關係圖(圖 8)新的管線防蝕效果判定方法^[11,12]，替代原有波爾拜 (poubaix)E-pH 舊式陰極防蝕標準(圖 9)。

當地下管線有交流電壓干擾時，當有防蝕包覆缺陷存在時，必然會有交流干擾電流從防蝕包覆缺陷處泄入大地，造成管線金屬交流電腐蝕，同時交

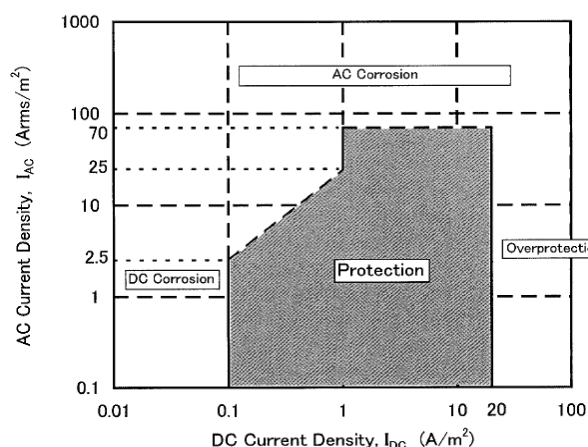


圖 8 地下管線新式陰極防蝕方法：AC、DC current density 腐蝕關係圖。

Figure 8 Graphic illustration of the cathodic protection criteria for buried steel pipelines based on DC and AC current densities measurement with coupons.

流電壓也會因而降低；但管線防蝕包覆的缺陷位置與大小是隨機的，因此由何處泄入大地無法得知，因此實際檢測存在困難。由於以上的原因，以往以交流電壓來判定交流腐蝕風險的方法似乎有改善的空間。最近的研究趨勢傾向以電流密度做為評估 AC 腐蝕，因此只能利用輔助電極法(coupons)測量管線泄漏電流密度的技術出現在許多論文上^[13]，他們主要依據 ER 原理改良設備所研發的技術，其中包括分析儀器及輔助電極 AC corrosivity probe(圖 10)，它們可以在現場量測 AC、DC 電壓及電流密度(圖 11)。

6. 相關法規與標準

目前世界先進的國家都相當重視腐蝕的問題，根據統計^[14]美國因腐蝕的損失約佔全國總生產額的 4.2%，像美國這麼重視防蝕的問題的國家都造成這麼大的損失。反觀我國，查遍國內相關法規，並未找到有關地下管線及油槽防蝕問題之相關正式法令或規範的記載，可見我們對的腐蝕問題是多麼的不重視。有關地下管線的法規以美國及中國大陸最為完備。對於地下管線交流電腐蝕的干擾問題，目前也僅有美國及中國大陸有系統的訂定規範。其中美國的規範著重人身的安全；而中國的標準則著重腐

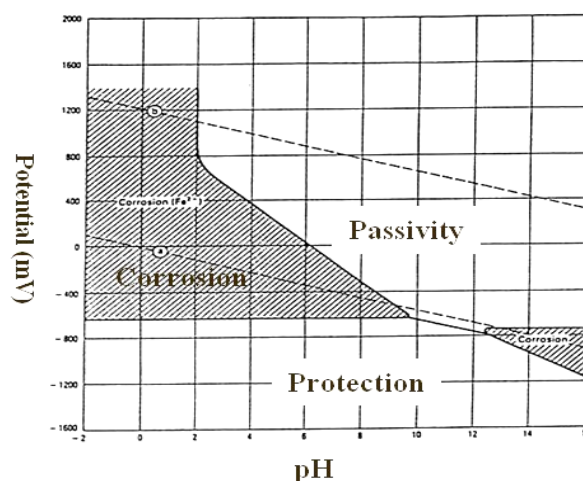


圖 9 Fe-H₂O 電位- pH 平衡圖。

Figure 9 Simplified potential-pH diagram for iron.



圖 10 AC 腐蝕偵測電極。
Figure 10 Appearance of AC corrosion probe for underground pipelines.

蝕的防治。

美國 NACE Standard RP0177-95^[15]，這個標準包含交流電和雷電作用的確定、陰極保護中雜散電流干擾的特殊考慮及 AC 排流裝置的設計考慮三部分。該標準所推薦的作法適用於現有金屬結構物可能遭受交流影響和雷電作用的確定。並概述了可能

存在對於防蝕系統和電位量測設備的一些所應考慮的事項。最後敘述用於減輕金屬結構物上的交流影響，減少對結構物的損害，以及降低與這些結構物接觸人員的電氣危險的各種保護設備。此標準比較著重人身安全方面的考量，對於管道交流電腐蝕危害的問題著墨較少。

中華人民共和國國家標準(GB) SY/T 0032-2000 埋地鋼質管道交流排流保護技術標準^[16]：主要參考美國 NACE RP 0177-95 和德國防干擾仲裁委員會 (SFB)1982 年 5 月 N0-7 技術建議書《關於在三相高壓電力系統和單線鐵道系統附近的管道設備運行標準》該標準對管道交流電腐蝕危害的控制作了較全面、詳盡的規定。該標準考慮到人身安全電壓控制不屬於金屬防腐蝕技術範疇，因此對在交流電干擾環境中人身危害的問題及設備安全電壓的控制，僅在"基本規定"這一章，定性提出應遵守的必要的技術要求。其他內容還包括：調查與測試、排流保護設施、排流保護系統的調整及效果評定、運行與管理。其中對於地下管線 AC 感應電壓的量測方法，是目前所有文獻報告中有關 AC 干擾檢測技術中最具體的，內容值得我們學習。

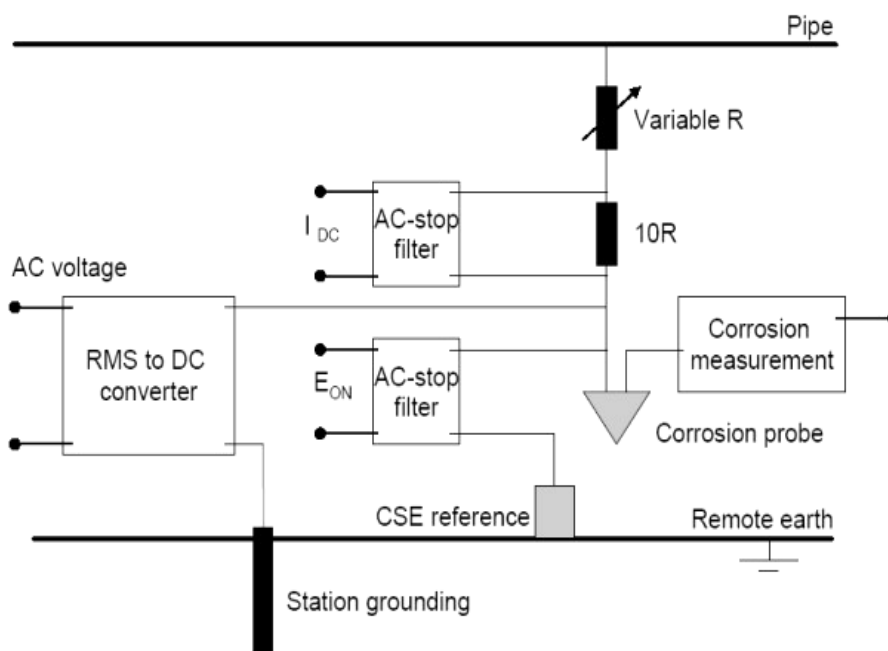


圖 11 現場 AC、DC 電流密度測量原理。
Figure 11 Schematic circuit layout for field Current density measurement.

參考文獻

1. 胡士信主編，陰極保護工程手冊，化學工業出版社，北京，1999年，第9頁。
2. C. E. Galimberti, "Corrosion of Lead By Alternating Current", Corrosion, 20 (1964) 150t-157t.
3. J. F. Williams, "Corrosion of Metals under the Influence of Alternating Current", Materials Protection, 5 (1966) 52-53.
4. I. Ragault, "AC corrosion induced by v.h.v. electrical lines on polyethylene coated steel gas pipelines", CORROSION/98, Houston, TX: NACE International, 1998.
5. R. G. Wakelin and R. A. Gummow, "Ac corrosion-case histories, test procedures, and mitigation", CORROSION/98, Houston, TX: NACE International, 1998.
6. 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 (2004).
7. R. W. Bosch, "A theoretical study of ac-induced corrosion considering diffusion phenomnt", Corrosion Science, 40 (1998) pp. 323-336.
8. NACE Standard RP0169-1982: "Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems", NACE International, Houston, Texas, 1982.
9. NACE Standard RP0169-2002: "Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems", NACE International, Houston, Texas, 2002.
10. Robert G. Wakelin, P.Eng., Christopher Sheldon, "Investigation and mitigation of AC corrosion on a 300 mm diameter natural gas pipeline", Corrosion/2004 NACE International Conference, paper No.205 (2004).
11. Yuji Hosokawa, "New cp criteria for elimination of the risks of ac corrosion and overprotection on cathodic ally protected pipelines", Corrosion/2002 NACE International Conference, Paper No. 111 (2002).
12. Yuji Hosokawa, "New cp maintenance concept for buried steel pipelines", Corrosion/2004 NACE International Conference, Paper No.04047 (2004).
13. B. Baumgarten and L.V. Nielsen, "Ac-induced corrosion in pipelines: Detection, characterisation, and mitigation", Corrosion/2004 NACE International Conference, Paper No.04211 (2004).
14. 同參考文獻 1, p. 3.
15. NACE Standard RP0177-95: "Mitigation of alternating current and lightning effects on metallic structures and corrosion control systems", NACE International, Houston, Texas, 1995.
16. 中華人民共和國國家標準(GB) SY/T 0032-2000 [埋地鋼質管道交流排流保護技術標準]。

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

