

輸送自來水用不銹鋼地下埋管之腐蝕破損分析

Corrosion Failure Analysis of Underground Stainless Steel Pipe Used For Water Transportation

黃何雄¹ 鄭潔虹² 蔡文達³

摘要

本文是以輸送自來水用不銹鋼地下埋管的腐蝕破損案例為研究課題。此案例為南部某處不銹鋼地下埋管因腐蝕破損而導致所輸送之自來水洩漏，造成了資源的浪費。根據現場勘察、材料金相分析以及土壤性質分析等結果，提出以下幾點有關不銹鋼埋管腐蝕破損防治對策之建議。從改善材質的觀點而言，建議提高不銹鋼埋管材料化學成份及組織結構的均勻性，並避免偏析(segregation)或夾雜物(inclusion)的產生，以減少容易發生腐蝕的位置。另外，因本研究所分析之不銹鋼埋管是板材經彎曲加工後再銲接成型，故建議使用前先施以消除殘留應力的熱處理，以避免腐蝕反應的加速進行。從改善埋管腐蝕環境的觀點而言，建議改善埋管的施工措施，並於不銹鋼管周圍加埋砂質土壤，藉以增加埋管周圍環境之乾燥性及降低其導電度，以減少土壤的腐蝕性。

一、前言

不銹鋼材料因具有良好的耐蝕性，故於日常生活中的應用範圍廣泛，例如輸送自來水的地下管線便是其中之一。然而在實際的使用環境中，不銹鋼埋管仍可能會發生腐蝕，其原因主要是與不銹鋼材料的冶金參數（例如組織及成份等）及埋管土壤環境的性質（例如酸鹼度、導電度及滲水性等）有關。

不銹鋼最容易受到腐蝕侵害的型態主要是屬於局部性的腐蝕(localized corrosion)[1]。這些看似局部區域的劣化現象，卻常常導致不銹鋼材料無法發揮應有的功能，甚至災害的發生。不銹鋼局部腐蝕的位置通常易發生在表面污垢等

-
- 1.成功大學材料防蝕研究中心 助理研究員
 - 2.成功大學材料防蝕研究中心 研究助理
 - 3.成功大學材料科學及工程學系 教授
成功大學材料防蝕研究中心 主任

堆積物處，若材料內部有內應力或不純物偏析等，也容易發生局部性的腐蝕(例如孔蝕(pitting corrosion)、間隙腐蝕(crevice corrosion)及應力腐蝕破裂(stress corrosion cracking, SCC))。造成不銹鋼埋管腐蝕的主要原因即為材料埋藏在地下時，潮濕的土壤環境及材料化學成份或組織的不均勻性會促成腐蝕的發生，進而使埋管材料穿孔或破裂。對於輸送自來水用的埋管而言，若因腐蝕而導致埋管破損時，除了能源的浪費外，飲用水質遭受污染亦是一個值得重視的問題。

本研究是針對南部某處輸送自來水用 304 不銹鋼埋管的破損案例，進行管材表面及橫截面的金相觀察與分析，並配合漏水現場的勘察及埋管周圍的土壤性質分析，提出防治的建議。

二、現場勘查

2.1 第一次現場勘查

作者等人於第一次至埋管漏水處勘察時，破損的埋管已被更換新管(材質為 304 不銹鋼)，並完成土壤回填工作。此次破損之埋管材料為 304 不銹鋼，使用時間約為一年，用途為傳輸自來水。

2.2 第二次現場勘查

第一次發生不銹鋼埋管破損處經更換新管數月後再度發生漏水現象。作者等人再度至不銹鋼埋管漏水處勘察(與第一次勘察地點相同)，此時埋管破損部分已被更換，但尚未回填土壤。此次破損之 304 不銹鋼埋管即為數月前所更換之新管。

三、金相分析

3.1 第一次破損之 304 不銹鋼埋管

圖 1(a)為第一次破損之 304 不銹鋼埋管經清水清洗後表面局部腐蝕型態；圖 1(b)為圖 1(a)中 A-A 橫截面之光學金相圖；圖 1(c)為圖 1(a)中 B-B 橫截面之光學金相圖。圖 1(b)顯示，當腐蝕區域從鋼管外壁表面向內部延伸時(箭頭所指)，管壁內與軸向垂直的環向平面可觀察到層狀的腐蝕型態。另外，雖然圖 1(a)之 B-B 橫截面靠近外管壁附近並無明顯的腐蝕發生，然而 B-B 橫截面(圖 1(c))亦顯示出與 A-A 橫截面(圖 1(b))相似之層狀腐蝕型態。圖 1(c)所顯示管壁內部的腐蝕型態可能是圖 1(b)中層狀腐蝕區域於管壁內延伸擴展而成的結果。

圖 2 為圖 1(a)右下側 C-C 虛線處橫截面金相(金相浸蝕液為體積比 1 : 1 : 1 之 HCl、HNO₃ 及 H₂O)。由圖 2 顯示,在沃斯田鐵相 304 不銹鋼的基地(matrix)中發現許多棒狀殘留的 δ 肥粒鐵相(如白色箭頭所指處),以及平行於管壁環向的夾雜物(inclusion)(如黑色箭頭所指處),此夾雜物經能量分散光譜儀(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)分析得知含有較基地為高的 Mn 及 S 含量。上述材質成份及組織的不均勻性,對材料的耐蝕性(例如耐局部腐蝕性)有不利的影響。本研究中圖 1 (b) 及 (c) 所顯示的層狀腐蝕型態可能與材質本身的不均勻性有關。

3.2 第二次破損之 304 不銹鋼埋管

圖 3(a)為第二次破損之 304 不銹鋼埋管經清水清洗後表面局部腐蝕型態。圖 3(b)為圖 3(a)中 A 處的腐蝕表面經丙酮清洗後的掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)金相圖。圖 3(c)為圖 3(a)中銲道附近 304 不銹鋼母材 a-a 橫截面的 SEM 金相圖。圖 3(d)及(e)為圖 3(a)之 b-b 橫截面(包含銲道)光學金相圖。

圖 3(a)顯示,鋼管表面腐蝕區域除包括銲道外,同時在 304 不銹鋼母材也可觀察到蝕孔(箭頭所指)。此外,由圖 3(b)得知,鋼管表面有許多腐蝕凹孔發生,並且在局部處還可觀察到排列整齊的凹孔形式(箭頭所指),此腐蝕凹孔的發生可能與材料內部 δ 肥粒鐵相的存在有關。另一方面,從 304 不銹鋼管的軸向截面金相圖觀察結果顯示(圖 3(c)),管壁內與軸向平行的平面可觀察到層狀的腐蝕型態(與第一次破損的 304 鋼管橫截面腐蝕型態相似,參考圖 1(b)及(c))。由圖 3(d)及(e)可知,不論偏離銲道處(圖 3(d))或在銲道附近(圖 3(e))均可觀察到裂縫自埋管表面向內部延伸。由於本研究之不銹鋼埋管是板材經彎曲加工後再銲接成型,使用前並未施以適當熱處理來消除銲接殘留應力,故圖 3(d)及(e)所顯示應力腐蝕裂縫的發生,除了要考慮材質本身的均勻性及土壤環境的腐蝕性外,銲接殘留應力的存在亦是可能的原因之一。

四、土壤性質分析

4.1 pH 值

作者於第二次現場勘察時取回埋管附近的土質,利用環保署公告之土壤中酸

驗值測定方法[2]，進行土壤的 pH 值量測，結果說明如下：

1. 地表下約 10 公分處之 pH 值：8.6
2. 地表下約 100 公分處(即埋管深度)之 pH 值：
 - (1) 發生局部腐蝕區域附近平均 pH 值：7.7
 - (2) 未發生局部腐蝕區域平均 pH 值：8.8

由上述結果顯示，除了埋管發生局部腐蝕區域附近之土質 pH 值較低(pH7.7)外，埋管附近土質之 pH 質變化受深度影響不大(pH 值均在 8.7 ± 0.1)。雖然不銹鋼埋管表面局部腐蝕發生位置的真正 pH 值並未量測，但可以理解的，由於局部腐蝕（孔蝕或間隙腐蝕）的現象可能會造成埋管表面局部區域的酸化作用[3]，導致 pH 值會低於附近環境。作者曾直接以 pH 試紙量取覆蓋腐蝕區域表面泥土的 pH 值，結果測得其 pH 約為 7.0。因此覆蓋腐蝕區域下方（真正腐蝕發生的位置）泥土之 pH 值可估算低於 7.0，即呈微酸性的環境。

4.2 比導電度

採集第二次現場勘察時破損不銹鋼埋管旁之土壤（黏質土）為分析樣本，根據美國土壤分析方法進行比導電度測定[4]。分析結果顯示，埋管附近的比導電度為 5.1 mmhos/cm。許多相關文獻均指出，比導電度超過 1mmhos/cm 的土壤均屬“嚴重腐蝕性”的等級[5，6]。因此，就比導電度而言，本研究中不銹鋼埋管所處土壤環境對材料的耐蝕性質有不利的影響。

4.3 陰離子(Cl^- 及 SO_4^{2-}) 濃度

同 4.2 節比導電度量測的分析樣本，根據美國土壤分析方法製作土壤飽和液[4]，再利用離子層析儀分析土壤飽和液中之 Cl^- 及 SO_4^{2-} 濃度。分析結果顯示， Cl^- 濃度約為 10^3 ppm(海水之 Cl^- 濃度約為 10^4 ppm 以上;成功大學材料系中庭土壤之 Cl^- 濃度約為 10 ppm)； SO_4^{2-} 濃度約為 2600 ppm(成功大學材料系中庭土壤之 SO_4^{2-} 濃度約為 25 ppm)。此土壤中 Cl^- 及 SO_4^{2-} 的存在，將對埋管材料的腐蝕反應有加速作用。

五、建議

(一) 從改善材質的觀點而言，建議增加不銹鋼埋管材料之化學成份及組織的均勻性，避免偏析或夾雜物的產生，以減少易發生腐蝕的位置。因本研究所

分析之不銹鋼埋管是板材經彎曲加工後再銲接成型，故建議先施以適當熱處理來消除銲接殘留應力，以避免腐蝕反應的加速進行。

- (二) 從改善腐蝕環境的觀點而言，建議改善埋管施工措施，並於不銹鋼埋管周圍加埋砂質土壤，進而增加埋管周圍環境之乾燥性及降低其導電度，以減少土壤的腐蝕性。

六、參考文獻

1. R. A. Lula, *Stainless Steel*, revised edition from *An Introduction to Stainless Steel*, written by J. Gordon Parr and Albert Hanson, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1988, Chapter 8.
2. 行政院環保署, (80)環署檢字第 27038 號公告, “土壤中酸鹼值測定方法,” 民國 80 年 8 月 12 日。
3. M. G. Fontana, *Corrosion Engineering*, 3rd ed., McGraw-Hill, Singapore, 1988, p.66.
4. J. D. Rhoades, “Soluble Salts,” in *Methods of Soil Analysis, Part 2*, edited by A. L. Page, 2nd ed., American Society of Agronomy, Wisconsin, 1982, p.167.
5. J. D. Palmer, *Materials Performance*, Vol.13, No.1,1974, p.41.
6. J. D. Palmer, “Environmental Characteristics Controlling the Soil Corrosion of Ferrous Piping,” in *Effects of Soil Characteristics on Corrosion*, ASTM STP 1013, V. Chaker and J. D. Plamer Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, p.5。

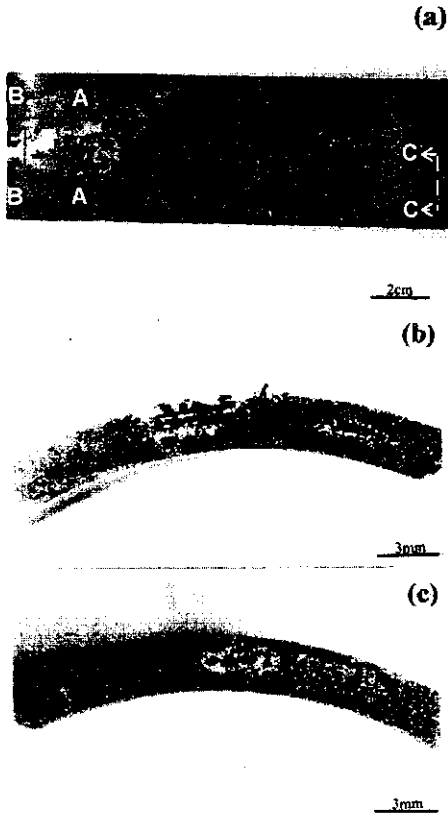


圖 1 (a)第一次破損之 304 不銹鋼埋管表面局部腐蝕型態；(b)(a)中 A-A 橫截面之光學金相圖；(c)(a)中 B-B 橫截面之光學金相圖。



圖 2 圖 1(a) C-C 橫截面光學金相圖。

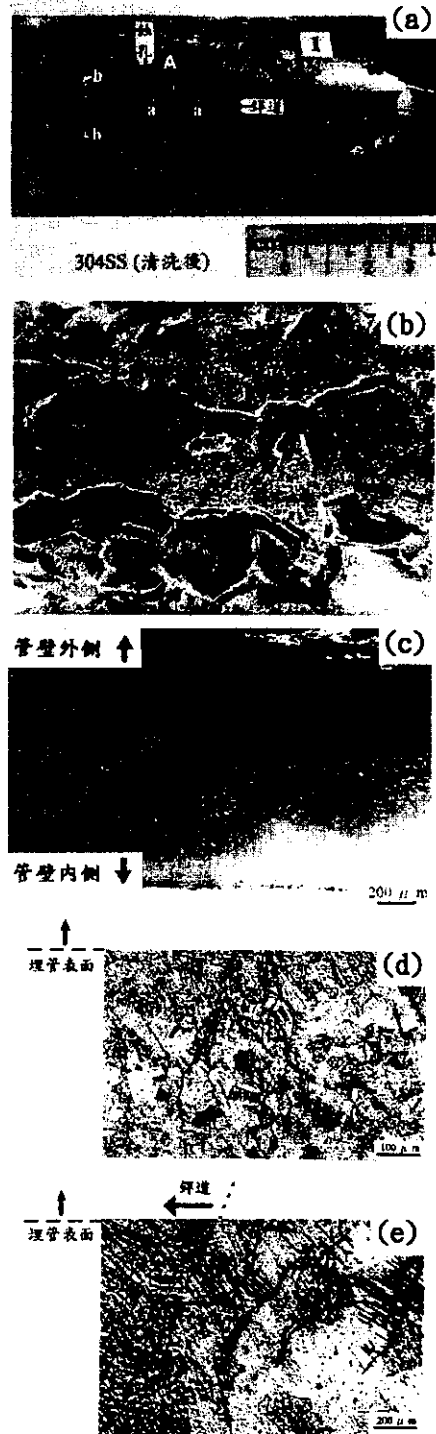


圖 3 (a)第二次破損之 304 不銹鋼埋管表面局部腐蝕型態；(b)(a)中 A 處局部放大 SEM 金相圖；(c)(a)中 a-a 橫截面 SEM 金相圖；(d)及(e)(a)中 b-b 橫截面之光學金相圖。