

火力發電廠廠用冷卻水系統微生物腐蝕之研究

顏秀崗 *¹、李季眉 ²、洪健根 ¹、吳麗芬 ²、何文賢 ¹、張正君 ¹、邱善得 ³

Microbiologically Influenced Corrosion on A106 Carbon Steel in Water Cooling System of Thermal Power Plant

S. K. Yen *¹, C. M. Lee ², C. K. Hung ¹, L. F. Wu ², W. H. Ho ¹,
C. C. Chang ¹, S. D. Chyou ³

摘 要

火力發電廠廠用冷卻水約 300 噸，因冷卻水中含多種的微生物而造成輸送鋼管 (A106 碳鋼) 腐蝕，所以添加抑制劑、殺菌劑來改善此一現象。廠用冷卻水可分離出多種細菌包含中溫菌和高溫菌兩大類，將所培養之細菌進行腐蝕試驗，試驗方法包含電化學動態循環極化、交流阻抗及腐蝕電位趨勢圖、並用 SEM 觀察試片腐蝕前後之表面型態等。

研究結果發現抑制劑 (鉬酸鹽) 和殺菌劑對中溫菌有抑制碳鋼腐蝕效果，但對高溫菌則大都無法發揮抑制腐蝕效果，經 SEM 觀察碳鋼在細菌腐蝕後，表面氧化層的孔洞增加且變大，若處於高溫菌的環境下則更加嚴重，不但氧化膜幾乎不見甚至碳鋼底材有孔蝕現象發生。由腐蝕電位趨勢圖可發現，當抑制劑或殺菌劑對碳鋼有抑制腐蝕效果時，腐蝕電位會處於較貴重的電位；反之則朝活潑的電位偏移。交流阻抗實驗結果顯示，當細菌層、氧化層與電雙層的阻抗較大時，碳鋼有較好的抗蝕能力。

關鍵詞：電化學動態循環極化；交流阻抗；腐蝕電位趨勢圖。

ABSTRACT

The volume capacity of cooling water used in Taichung thermal power plant was about 300 m³. The amount of microorganism was increasing with increasing time and the microbiologically influenced corrosion (MIC) was also getting serious. Therefore, increasing the inhibitor concentration and/or adding some bactericide is a feasible method to control MIC. Various kinds of bacterial were found in the cooling water. In general, two categories including medium

-
1. 中興大學材料工程學系
Dept. Materials Engineering, National Chung Hsing University
 2. 中興大學環境工程學系
Dept. Environmental Engineering, National Chung Hsing University
 3. 台灣電力公司電力綜合研究所
Power Research Institute, Taiwan Power Company
- * 連絡作者(skyen@dragon.nchu.edu.tw)

temperature germs and high temperature germs were separated. The corrosion characteristics were evaluated by potentiodynamic polarization tests, AC-impedance tests, corrosion potential trends, and SEM observation.

It was found that the molybdate inhibitor and the bactericide was effective for medium temperature bacteria on controlling the corrosion of A106 carbon steel tubes but was not effective for high temperature bacteria. After corrosion test, the oxide film on carbon steel was degraded gradually with increasing corrosion time. With inhibitor and bactericide added, the oxide film was sustained in medium temperature bacteria environment but it was degraded and the steel was pitted in high temperature bacteria. Corrosion potentials of carbon steel were maintained at noble region for effective controls but shifted to active region for ineffective controls. Also, the much higher electrical resistance of germ layer, oxide layer, and double layer was found on effective controls and much lower on ineffective controls.

Keyword: Potentiodynamic polarization; AC-impedance; Ecorr trends.

1. 前言

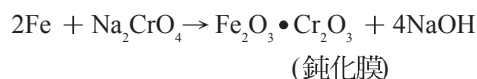
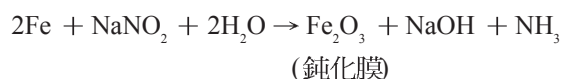
微生物造成的腐蝕 (microbiologically influenced corrosion, MIC) 是工業上常見的問題，常發生於近中性停滯流動的水環境中 (pH 4-9, 10-50°C)，誘發工業設備中之碳鋼、不銹鋼、鋁合金及銅合金之腐蝕，造成經濟上難以估計的損失。此種腐蝕現象常由許多不同類型生理特性的細菌，共生在生物膜中以複雜的方式相互作用而成。

近年來由於腐蝕監控的應用，電廠的腐蝕問題獲得不少改善，主要有1.隨時掌控在運轉當中，發電設備構成材料的腐蝕狀況，避免設備因腐蝕造成停機或危害運轉人員；2.即時指示設備可能發生的腐蝕狀況，運轉人員得以採取必要之預防措施；3.在改變電廠操作程序之前，藉腐蝕監控了解對材料可能產生的影響；4.依據腐蝕監控數據，預估設備的殘存使用壽命。

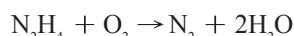
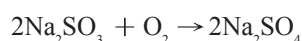
目前一般電廠廠用冷卻水系統大多採鉬酸鹽混合型緩蝕劑。鉬酸鹽和亞硝酸鹽的主要作用是針對鐵和鈦等合金之腐蝕防護，氮偶環化合物則是用以防護銅合金^[1]。以台中火力發電廠為例^[1]，研究對一運轉中電廠之冷卻系統進行緩蝕劑監測，發現廠用冷卻水系統使用鋁黃銅管材，因為腐蝕而更換為不銹鋼或鈦管。電廠冷卻水系統之空壓機冷卻器的隔板也因伽凡尼腐蝕而必須更換。粉煤機冷卻器亦有破管現象。主汽機潤滑油冷卻器使用碳鋼及鋁黃銅材料，也發現有腐蝕現象，由此可見冷卻水中緩蝕

劑的監控有迫切性。

為因應環保法規，台中火力發電廠用冷卻水目前添加鉬酸鹽系防蝕抑制劑，而不使用傳統的鉻酸鹽抑制劑，但鉬酸鹽系防蝕抑制劑防蝕效率低於傳統的鉻酸鹽；又在成本考量下，必須考慮經濟有效的抑制劑加藥量，腐蝕抑制劑添加於腐蝕性環境中能有效降低材料的腐蝕速率，有些抑制劑的作用是在抑制陽極反應之進行，但是因為是氧化劑，所以必須使用足量，否則會加速腐蝕造成孔蝕。常用的有六價的鉻酸離子 (CrO_4^{2-} 或 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) 和亞硝酸離子 (NO_2^-)，其化學反應為^[1]：



而有些則是抑制陰極反應。譬如亞硫酸鈉和聯胺 (hydrazine) 等皆是，其化學反應為：



抑制劑通常會在金屬表面形成阻絕膜，以保護金屬基材。通常腐蝕抑制劑具有臨界濃度，必需達到或超過此濃度才有防蝕效果，否則有時反而會增加腐蝕；因此必須經常監測抑制劑之濃度，以便作

適當之補充。

運轉中亦發現溫度上升對抑制劑具敏感性，而使抑制劑達不到預期的效果。運轉中需進行沖放、補充除礦水及添加抑制劑等操作，使得抑制劑含量呈動態變化。由於電廠尚未進行線上腐蝕監測，化學人員需不定時採取水樣，分析鉬酸鹽濃度，較難掌控抑制劑在運轉中之實際使用效果。近兩年來於台中電廠進行腐蝕監測^[4]，研究結果發現，50ppm 之緩蝕劑添加濃度，可抑制均勻腐蝕，但無法防止局部腐蝕。另外細菌之存在亦使腐蝕抑制劑需要量提高，故有必要檢討目前添加量是否足夠，並研究微生物腐蝕 (MIC) 之原因及對策。

2. 實驗方法

本實驗使用 A106 碳鋼作為基材，其主要成分如表 1. 所示。實驗使用的菌株為台中火力發電廠廠用冷卻水系統中分離出來的純種細菌，包含中溫菌 (B2、TPM-1、TPM-3) 和高溫菌 (TPH-2、TPH-3、TPH-5-2、TPH-7) 共七株菌，各細菌之菌落特徵與菌體的形狀、大小如表 2. 所示^[5]。

2.1 試片的前處理

碳鋼管材經剪裁後，以清潔劑將試片表面的油污洗掉，之後置於丙酮中以超音波震盪 15 分鐘，再以去離子水沖洗乾淨，最後置於室溫下陰乾。

2.2 電化學動態循環極化

藉由電化學動態循環極化技術 (potentiodynamic polarization technique)，來量測試片在不同細菌溶液中之電化學性質。本研究以飽和 AgCl 做為參考電極，白金作為輔助電極，待測試片為工作電極。以掃描速率 1 mV/sec，自開路電位以下 500 mV 處向陽極方向掃描，直到開路電位以上 900mV 處再由陽極掃回原來開路電位以下 500 mV 處，來獲得循環極化曲線，由曲線圖可得到在不同細菌腐蝕溶液中，其腐蝕電位 (E_{corr})、腐蝕電流密度 (I_{corr})、陽極極化阻抗 (R_p)，再由極化曲線求得腐蝕電位 (E_{corr})、孔蝕電位 (E_p)、保護電位 (E_{pp})、腐蝕電流

密度 (I_{corr})，以了解試片在不同細菌溶液中的抗蝕能力。

2.3 電化學交流阻抗

本實驗採用之儀器為電化學阻抗分析儀 (EIS, M398 軟體) 以及恒定位儀 (EG & G Parc Potentiostat)，由恒電流電位儀以 5 mV 的微小電壓提供交流訊號產生所需的振幅，掃描頻率範圍由高頻 10 KHz 掃描至低頻 10 mHz，測量試片在不同細菌溶液中受頻率影響而產生的各種數據變化，根據測得的數據由阻抗 (absolute impedance, $|Z|$) 和頻率 (frequency, f) 可繪出 Bode-plot，相角 (phase, ϕ) 和頻率 (frequency, f) 可繪出 phase-plot，若取實部阻抗 (real impedance component, Z_{Re}) 和虛部阻抗 (imaginary impedance component, Z_{Im}) 可繪出 Nyquist-plot。配合 EQU (Equivalent Circuit, EC) 等效電路模擬，計算出試片表面阻抗變化情形。

2.4 腐蝕電位趨勢圖

試片置於不同細菌溶液中得到電位隨時間的變化趨勢圖，實驗裝置以試片為工作電極，白金作為輔助電極，飽和 AgCl 做為參考電極，其標準電位相對於氫電極 (SHE) 之電位為 + 0.197 V，監測時間為 6 小時。一般而言所測得試片在不同細菌溶液中的腐蝕電位數值越大 (貴重) 時，表示試片在溶液中處於較安定的狀態，愈不容易腐蝕；電位數值越小 (活潑) 時，表示試片在溶液中處於較活潑的狀態，愈容易腐蝕。

2.5 SEM 表面型態分析

利用掃描式電子顯微鏡 (SEM, JEOL, JSM-5400, Japan)，觀察試片未被細菌腐蝕及被腐蝕後的表面型態。

3. 結果與討論

3.1 動態循環極化測試

圖 1~ 圖 3 結果得知，抑制劑和殺菌劑對於 B2

細菌、TPM-1 細菌、TPM-3 細菌到第 7 天有抑制碳鋼腐蝕的效果(鈍化電流減小)；抑制劑對於 TPH-2 細菌(圖4)、TPH-3 細菌(圖6)、TPH-5-2 細菌(圖8)、TPH-7(圖10) TPH-2 細菌和 TPH-3 細菌 1 天後不但無效果而且有更容易腐蝕的現象，可能是抑制劑用量一開始即不夠所致，但此推測需做更進一步的實驗來證實。

殺菌劑對於 TPH-3 細菌有防蝕效果(圖7)；但對於 TPH-2 細菌(圖5)、TPH-5-2 細菌(圖9)、TPH-7 細菌(圖11)皆無防蝕效果，而且 TPH-7 細菌 7 天後更容易腐蝕且有孔蝕的現象。

3.2 交流阻抗測試

圖 12 為碳鋼置於抑制劑中交流阻抗電路模擬圖，圖 13. 為碳鋼置細菌溶液中交流阻抗電路模擬圖，細菌分別為中溫菌 TPM-3 與高溫菌 TPH-7，抑制劑和殺菌劑對 TPM-3 細菌均有防蝕的效果，但是對於高溫菌 TPH-7 均無防蝕效果。

表 3 為碳鋼基材置於抑制劑中 7 天後等效電路模擬結果，使用圖 12. 電路模擬的結果，可求得 R_s 、 R_o 、 R_{ct} (R_s ：水溶液之電阻， R_o ：氧化層之電阻， R_{ct} ：電雙層之電阻)。碳鋼置於不同條件 TPM-3 細菌溶液中交流阻抗測試結果，利用圖 13. 電路模擬的結果，可求得 R_s 、 R_b 、 R_o 、 R_{ct} ，其結果如表 4~ 表 6. 所示 (R_s ：水溶液之電阻， R_b ：細菌層之電阻， R_o ：氧化層之電阻， R_{ct} ：電雙層之電阻)。表 7~ 表 9. 為碳鋼置於不同條件 TPH-7 細菌溶液中交流阻抗測試後，利用圖 13 電路模擬的結果。

碳鋼在抑制劑中經過 7 天後 R_o 、 R_{ct} 都非常的大表示碳鋼表面的氧化層還很緻密，能夠保護內部的基材。就 TPM-3 細菌而言，當加入抑制劑後 R_o 、 R_{ct} 的值會比只有 TPM-3 細菌的 R_o 、 R_{ct} 值大十倍以上，表示只有 TPM-3 細菌時，氧化層上微孔洞變多且變大，變的較不緻密甚至剝落而裸露出鐵基材，以致於碳鋼變得很容易腐蝕；當加入抑制劑後，抑制劑能使表面的氧化層不被細菌破壞進而保護內部基材，加入殺菌劑後更是明顯，碳鋼防蝕的效果更好。由 R_b 結果可知，只有 TPM-3 細菌和加入抑制劑的電阻值相差不大，但是當加入殺菌劑後

變大十倍以上，此現象可能是加入殺菌劑後，有效殺死細菌而使 R_b 值急遽增加並減少細菌與抑制劑在碳鋼表面之競爭，而使抑制劑能有效在碳鋼表面形成較緻密的鈍態膜而抑制腐蝕。

對於 TPH-7 細菌而言，當加入抑制劑後 R_b 、 R_o 、 R_{ct} 的值在第 1、2 天有輕微增加的效果，表示加入抑制劑後在第 1 天及第 2 天有防蝕的效果，但是效果不像 TPM-3 細菌顯著，這顯然與殺菌劑無法有效殺死 TPH-7 細菌細菌有關。

3.3 腐蝕電位趨勢圖

各種細菌不同條件 7 天後之腐蝕電位趨勢圖，如圖 14~ 圖 20. 所示。

由動態循環極化實驗得知，抑制劑和殺菌劑對於 B2 細菌、TPM-1 細菌、TPM-3 細菌到第 7 天仍有抑制碳鋼腐蝕的效果。由圖 14、圖15 結果可得知，B2 細菌和 TPM-1 細菌當加入抑制劑或殺菌劑時，腐蝕電位都有提高的現象，顯示碳鋼基材在細菌溶液中處於較安定的狀態，愈不容易腐蝕。圖 16，TPM-3 細菌加入抑制劑和只有 TPM-3 細菌兩者的起始腐蝕電位相差不大，但是加入抑制劑和殺菌劑的腐蝕電位會隨時間增加而有變大的趨勢，即碳鋼在細菌溶液中愈來愈安定。

對於高溫菌而言，由動態循環極化結果可知，抑制劑和殺菌劑對於 TPH-2 細菌、TPH-5-2 細菌、TPH-7 細菌皆無抑制碳鋼腐蝕的效果。圖 17 只有 TPH-2 細菌和加入殺菌劑的腐蝕電位相差不大，而加入抑制劑的腐蝕電位一開始雖然很大，但是很快地下降至只有 TPH-2 細菌的腐蝕電位下方，表示碳鋼在細菌溶液中仍處於較活潑的狀態，即加入抑制劑仍無抑制碳鋼腐蝕的效果。圖 19，TPH-5-2 細菌在加入抑制劑或殺菌劑時，兩者的起始腐蝕電位都明顯高於只有 TPH-5-2 細菌的腐蝕電位，但是隨時間增加兩者的腐蝕電位都急遽下降，到最後腐蝕電位都很接近，顯示抑制劑或殺菌劑對 TPH-5-2 細菌無抑制碳鋼腐蝕的效果。圖 20，TPH-7 細菌在加入抑制劑或殺菌劑時，腐蝕電位即與只有 TPH-7 細菌的腐蝕電位差不多，甚至到最後腐蝕電位急遽下降，如此碳鋼變得更容易腐蝕。

抑制劑對於 TPH-3 細菌無防蝕效果，但是加入殺菌劑後可達到抑制碳鋼腐蝕的效果。圖18，TPH-3 細菌加入抑制劑後，腐蝕電位與只有 TPH-3 細菌的腐蝕電位差不多；當加入殺菌劑後腐蝕電位明顯較高，隨時間增加也有變大的趨勢，表示加入殺菌劑有抑制碳鋼腐蝕的效果。

3.4 SEM表面型態分析

碳鋼基材經過超音波震盪 1 小時後表面即有微孔洞存在，孔洞的周圍都是像針狀的氧化物，如圖 21 所示。

碳鋼置於只有 B2 細菌 7 天後清除碳鋼表面後如圖 22 所示。碳鋼表面的孔洞變多但氧化層還在。圖 23 為置於只有 TPM-1 細菌 7 天後清除碳鋼表面之 SEM 圖，表面的氧化層破裂的很嚴重但是孔洞周圍都還是像針狀的氧化物。圖 24 為置於只有 TPH-2 細菌 7 天後清除碳鋼表面之 SEM 圖，表面的氧化層已大量剝落，圖 25 只有 TPH-3 細菌 7 天後清除碳鋼表面後，不僅表面的氧化層全都剝落，而且底部的鐵基材也被腐蝕的很嚴重。圖 26 置於只有 TPH-5-2 細菌 7 天後清除碳鋼表面後，表面的氧化層也全都剝落，底部的鐵基材也有被腐蝕的現象。

圖 27 為置於只有 TPM-3 細菌 7 天後清除碳鋼表面之 SEM 圖。由圖可以清楚看出氧化層都剝落而裸露出底部的鐵基材，且底部的鐵基材也有被腐蝕的現象。圖 28、圖 29 為置於 TPM-3 細菌 + 抑制劑 7 天後清除碳鋼表面之 SEM 圖和置於 TPM-3 細菌 + 抑制劑 + 殺菌劑 7 天後清除碳鋼表面之 SEM 圖。由交流阻抗實驗得知，置於 TPM-3 細菌 + 抑制劑和置於 TPM-3 細菌 + 抑制劑 + 殺菌劑 1~7 天的 R_o 、 R_{ct} 都很大(表5、表6.)，表示碳鋼表面的氧化層還有保護內部基材的功能。

圖 30~ 圖 32 為 TPH-7 細菌三種不同條件 7 天後清除碳鋼表面之 SEM 圖。由圖可以清楚看出底部的鐵基材被腐蝕的相當嚴重。甚至當加入殺菌劑後有明顯孔蝕現象產生。

4. 結論

1. 抑制劑、殺菌劑對於室溫菌都有抑制碳鋼腐蝕的效果；對於高溫菌除了殺菌劑對 TPH-3 細菌外大都無效果。
2. 當抑制劑或殺菌劑有效抑制碳鋼腐蝕時，腐蝕電位 E_{corr} 會處於較貴重的電位。
3. 交流阻抗實驗結果，當抑制劑、殺菌劑能有效抑制腐蝕時， R_b 、 R_o 、 R_{ct} 值較高。
4. 由 SEM 表面之觀察可看出碳鋼表面氧化層也會隨著抑制劑、殺菌劑之抑制腐蝕有效，大致保存；若無採取防治措施或無效，則氧化膜會逐漸被破壞殆盡。尤其是 TPH-7 細菌甚至有較深的孔蝕發現。
5. 由結論 2. 與 3. 可知量測 E_{corr} 、 R_b 、 R_o 及 R_{ct} 值，仍有效監測抑制劑與殺菌劑對 A106 碳鋼微生物影響腐蝕 (MIC) 之抑制效果。另外針對高溫菌 TPH-7 宜再深入研究、探討其它有效之殺菌劑，以達有效抑制腐蝕之目的。

謝誌

感謝台灣電力股份有限公司對本研究計畫之支持。

參考文獻

1. V. Otieno-Alego, N. Huynh, T. Notota, S. E. Bottle, and D. P. Schweinsberg, *Corrosion Science*, 41 (1999) pp. 685-697.
2. 台灣電力股份有限公司，「廠用冷卻水腐蝕抑制劑效果監測研究完成報告」，2000 年，第 1-2 頁。
3. 柯賢文，in：「腐蝕及其防制」，全華科技圖書出版，第 301-302 頁。
4. 台中電廠廠用冷卻水系統微生物控制研究期中報告，2003 年，第 1 頁。
5. 台中電廠廠用冷卻水系統微生物控制研究期中報告，2000 年，第 18-19 頁。

表 1. 高溫配管用碳鋼管(A106)成分(wt%)

Table 1. The composition of carbon steel (A106) used as pipes. (wt%)

C	Mn	P	S	Si	Fe
0.35	0.29~1.06	0.025	0.025	0.1	Bal.

表 2. 各細菌之菌落特徵與菌體的形狀與大小

Table 2. The characterizations of various bacteria

編號	菌落特徵(培養於 p 培養基時)	菌體的形狀與大小	菌數(cfu/mL)
B2	顏色：乳白色，形狀：圓形 0.5mm，邊緣：全緣	桿狀	
TPM-1	顏色：白色，形狀：圓形,2mm 隆起：中心凸狀，邊緣：全緣	桿狀，長 2-3 μ ，寬 0.7 μ	約 1×10^6
TPM-3	顏色：白色，形狀：圓形,1.5mm 隆起：中心凸狀，邊緣：全緣	桿狀，長 2-3 μ ， 寬 0.7 μ	約 1×10^6
TPH-2	顏色：白色，形狀：圓形,1mm 隆起：圓狀，邊緣：全緣	桿狀，有運動性 長 1.5 μ ，寬 0.5 μ	
TPH-3	顏色：白色，液體培養後溶液會變成棕色	桿狀， 長 1.5 μ ，寬 1 μ	
TPH-5-2	顏色：白色，形狀：圓形,1.5mm 隆起：圓狀，邊緣：全緣	桿狀，有運動性 長 1.5 μ ，寬 0.5 μ	
TPH-7	顏色：白色，形狀：圓形,2mm 隆起：圓狀，邊緣：全緣	桿狀，有運動性 長 1-1.5 μ ，寬 0.5 μ	

表 3. 碳鋼置於抑制劑中 7 天後等效電路模擬結果

Table 3. The equivalent simulated circuit of carbon steel immersed in solution with inhibitor added

$R_s(\Omega)$	$R_o(\Omega)$	$R_{ct}(\Omega)$
1350	90660	753900

表 4. 只有 TPM-3 細菌，等效電路模擬結果

Table 4. The equivalent simulated circuit of carbon steel immersed in TPM-3 bacteria solution

	$R_s(\Omega)$	$R_b(\Omega)$	$R_o(\Omega)$	$R_{ct}(\Omega)$
1 天	331.6	181	476	578.3
2 天	295.1	221.2	519.4	602.4
4 天	380	312	665.7	1570
7 天	360.2	286.7	617.1	1071

表 5. TPM-3細菌+抑制劑，等效電路模擬結果。

Table 5. The equivalent simulated circuit of carbon steel immersed in TPM-3 bacteria solution with inhibitor added.

	Rs(Ω)	Rb(Ω)	Ro(Ω)	Rct(Ω)
1 天	297	106	4064	8691
2 天	252	276	7143	32745
4 天	254	293	7410	35803
7 天	327	265	6340	17413

表 6. TPM-3細菌+抑制劑+殺菌劑，等效電路模擬結果。

Table 6. The equivalent simulated circuit of carbon steel immersed in TPM-3 bacteria solution with inhibitor and bactericide added.

	Rs(Ω)	Rb(Ω)	Ro(Ω)	Rct(Ω)
1 天	212.4	8472	12775	152820
2 天	227.5	4475	7564	72820
4 天	225.6	6720	9853	100100
7 天	205.7	5762	8021	86132

表 7. 只有TPH-7細菌，等效電路模擬結果。

Table 7. The equivalent simulated circuit simulation of carbon steel immersed in TPH-7 bacteria solution.

	Rs(Ω)	Rb(Ω)	Ro(Ω)	Rct(Ω)
1 天	313	162	867	1455
2 天	275	10.8	75	332.8
4 天	314.2	55.22	301.2	742.5
7 天	342.1	47.9	225.5	688.6

表 8. TPH-7細菌+抑制劑，等效電路模擬結果。

Table 8. The equivalent simulated circuit simulation of carbon steel immersed in TPH-7 bacteria solution with inhibitor added.

	Rs(Ω)	Rb(Ω)	Ro(Ω)	Rct(Ω)
1 天	202.6	127	5158	7792
2 天	198	85	3554	4685
4 天	230.4	24	1024	1358
7 天	220.4	34.31	1762	1980

表 9. TPH-7細菌+抑制劑+殺菌劑，等效電路模擬結果。

Table 9. The equivalent simulated circuit simulation of carbon steel immersed in TPH-7 bacteria solution with inhibitor and bactericide added.

	Rs(Ω)	Rb(Ω)	Ro(Ω)	Rct(Ω)
1 天	232.6	541.2	2420	7275
2 天	221.3	127.8	735	2733
4 天	152.6	11.83	448.6	1983
7 天	236.1	11.4	391.2	1623

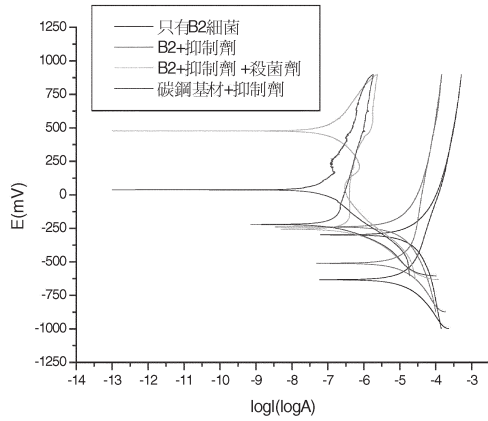


圖 1. 置於不同條件B2細菌下，7天後之動態極化曲線(抑制劑、殺菌劑均有防蝕效果)。
Figure 1 Comparisons of dynamic polarization curves of carbon steel immersed in B2 bacteria solution after 7 days (effective on corrosion resistance for inhibitor and bactericide).

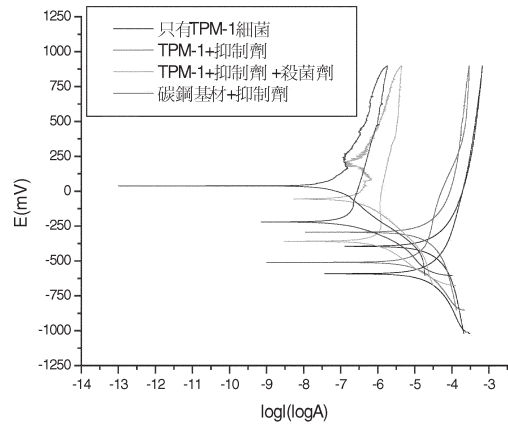


圖 2. 置於不同條件TPM-1 細菌下，7天後之動態極化曲線(抑制劑、殺菌劑均有防蝕效果)。
Figure 2 Comparisons of dynamic polarization curves of carbon steel immersed in TPM-1 bacteria solution after 7 days (effective on corrosion resistance for inhibitor and bactericide).

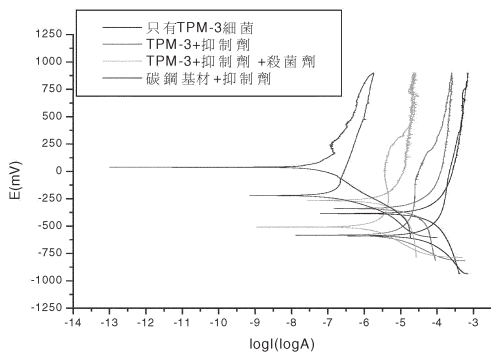


圖 3. 置於不同條件TPM-3 細菌下，7天後之動態極化曲線(抑制劑、殺菌劑均有防蝕效果)。
Figure 3 Comparisons of dynamic polarization curves of carbon steel immersed in TPM-3 bacteria solution after 7 days (effective on corrosion resistance for inhibitor and bactericide).

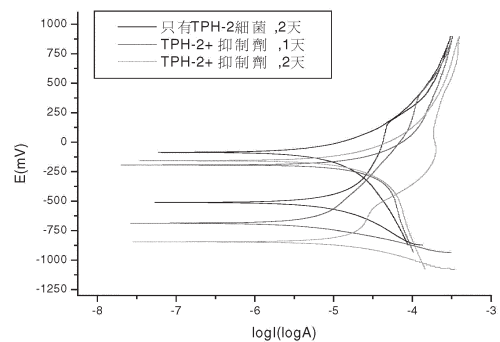


圖 4. 置於不同條件TPH-2細菌下之動態極化曲線(抑制劑無防蝕效果)。
Figure 4 Comparisons of dynamic polarization curves of carbon steel immersed in TPH-2 bacteria solution (ineffective on corrosion resistance for inhibitor).

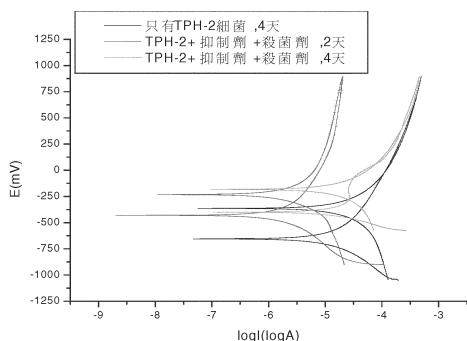


圖 5. 置於不同條件TPH-2細菌下之動態極化曲線(殺菌劑無防蝕效果)。
Figure 5 Comparisons of dynamic polarization curves of carbon steel immersed in TPH-2 bacteria solution (ineffective on corrosion resistance for bactericide).

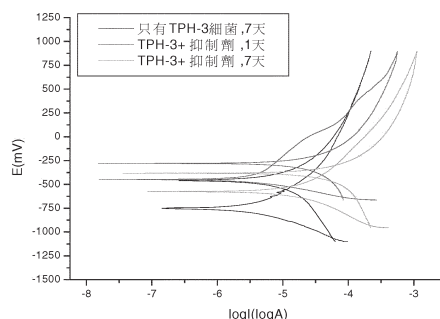


圖 6. 置於不同條件TPH-3細菌下，7天後之動態極化曲線(抑制劑無防蝕效果)。
Figure 6 Comparisons of dynamic polarization curves of carbon steel immersed in TPH-3 bacteria solution after 7 days (ineffective on corrosion resistance for inhibitor).

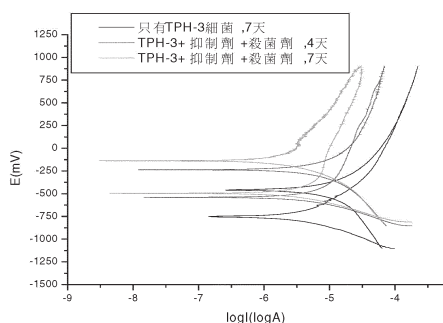


圖 7. 置於不同條件TPH-3細菌下，7天後之動態極化曲線(殺菌劑有防蝕效果)。
Figure 7 Comparisons of dynamic polarization curves of carbon steel immersed in TPH-3 bacteria solution after 7 days (effective on corrosion resistance for bactericide).

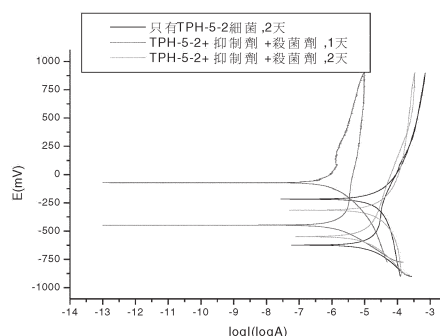


圖 8. 置於不同條件TPH-5-2細菌下之動態極化曲線(抑制劑無防蝕效果)。
Figure 8 Comparisons of dynamic polarization curves of carbon steel immersed in TPH-5-2 bacteria solution (ineffective on corrosion resistance for inhibitor).

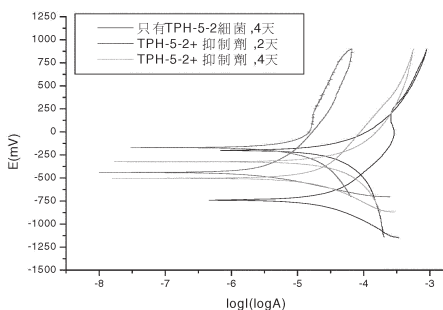


圖 9. 置於不同條件TPH-5-2細菌下之動態極化曲線(殺菌劑無防蝕效果)。
Figure 9 Comparisons of dynamic polarization curves of carbon steel immersed in TPH-5-2 bacteria solution (ineffective on corrosion resistance for bactericide).

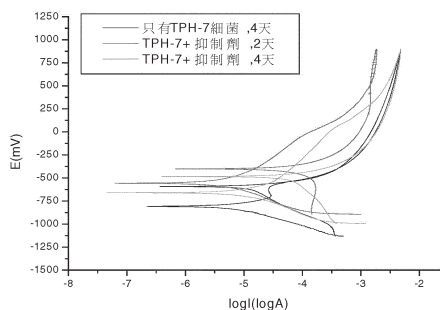


圖 10. 置於不同條件TPH-7細菌下之動態極化曲線(抑制劑無防蝕效果)。
Figure 10 Comparisons of dynamic polarization curves of carbon steel immersed in TPH-7 bacteria solution (ineffective on corrosion resistance for inhibitor).

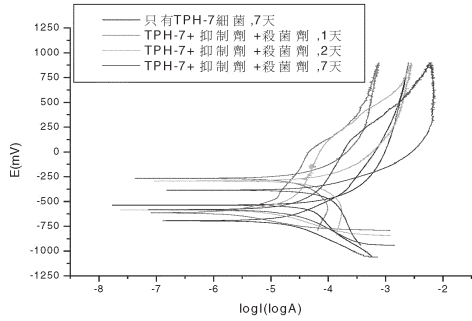


圖 11. 置於不同條件TPH-7細菌下之動態極化曲線(殺菌劑無防蝕效果)。
Figure 11 Comparisons of dynamic polarization curves of carbon steel immersed in TPH-7 bacteria solution (ineffective on corrosion resistance for bactericide).

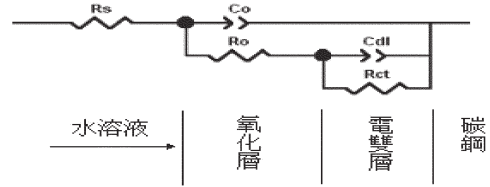


圖 12. 碳鋼置於抑制劑中交流阻抗電路模擬圖。
Figure 12 Equivalent simulated circuit of carbon steel in solution with inhibitor.

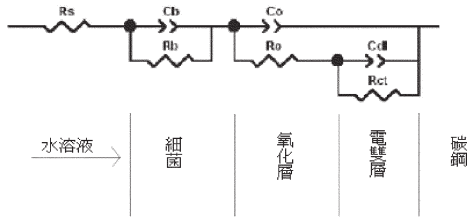


圖 13. 碳鋼置於細菌溶液中交流阻抗電路模擬圖。
Figure 13 Equivalent simulated circuit of carbon steel in bacteria solution.

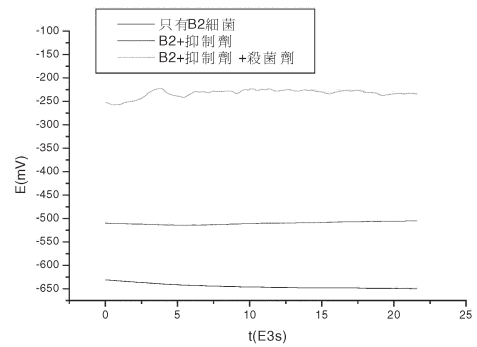


圖 14. 置於不同條件B2細菌，7天後腐蝕電位趨勢圖。
Figure 14 Corrosion potentials of carbon steel immersed in B2 bacteria solution after 7 days.

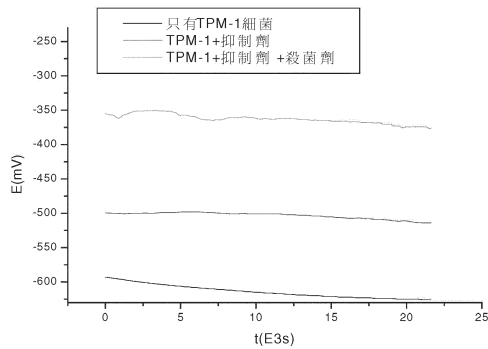


圖 15. 置於不同條件TPM-1細菌，7天後腐蝕電位趨勢圖。
Figure 15 Corrosion potentials of carbon steel immersed in TPM-1 bacteria solution after 7 days.

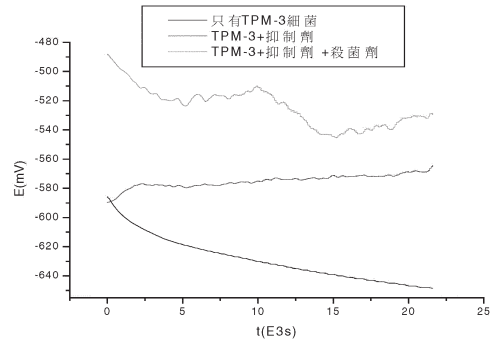


圖 16. 置於不同條件TPM-3細菌，7天後腐蝕電位趨勢圖。
Figure 16 Corrosion potentials of carbon steel immersed in TPM-3 bacteria solution after 7 days.

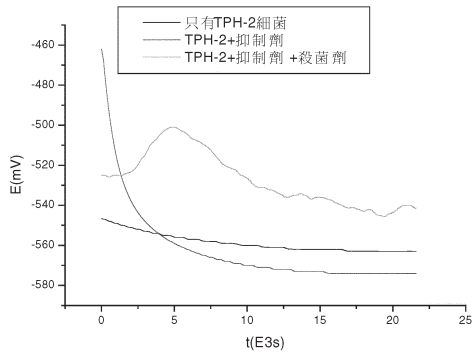


圖 17. 置於不同條件TPH-2細菌，7天後腐蝕電位趨勢圖。
Figure 17 Corrosion potentials of carbon steel immersed in TPH-2 bacteria solution after 7 days.

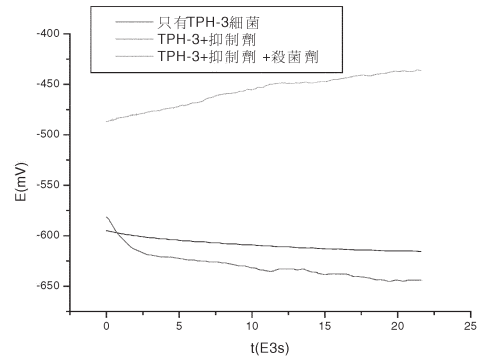


圖 18. 置於不同條件TPH-3細菌，7天後腐蝕電位趨勢圖。
Figure 18 Corrosion potentials of carbon steel immersed in TPH-3 bacteria solution after 7 days.

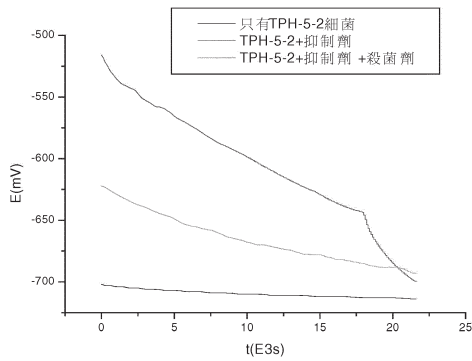


圖 19. 置於不同條件TPH-5-2細菌，7天後腐蝕電位趨勢圖。
Figure 19 Corrosion potentials of carbon steel immersed in TPH-5-2 bacteria solution after 7 days.

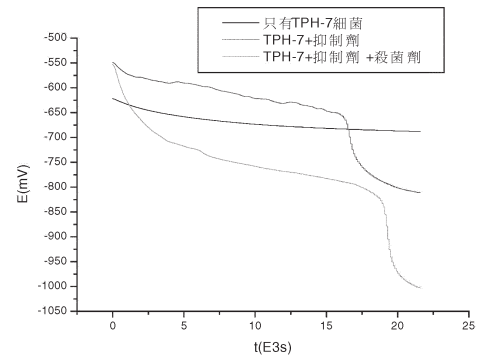


圖 20. 置於不同條件TPH-7細菌，7天後腐蝕電位趨勢圖。
Figure 20 Corrosion potentials of carbon steel immersed in TPH-7 bacteria solution after 7 days.

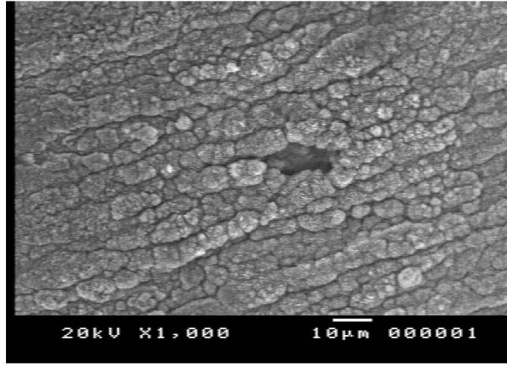


圖 21. 碳鋼經過超音波震盪後之SEM圖。
Figure 21 SEM micrograph of carbon steel after ultrasonic cleaning.

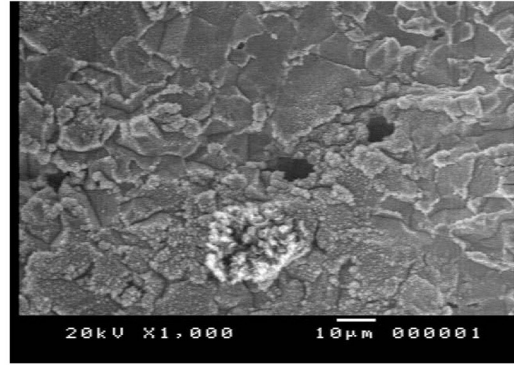


圖 22. 置於只有B2細菌7天後清除碳鋼表面之SEM圖。
Figure 22 SEM micrograph of carbon steel immersed in B2 bacteria solution for 7 days after ultrasonic cleaning.

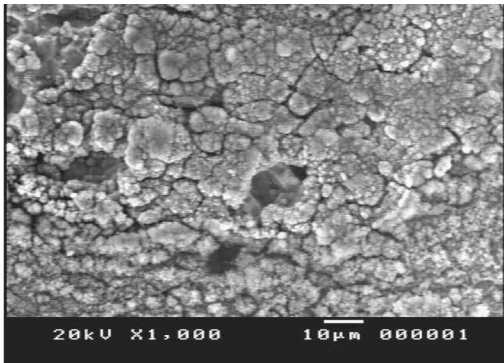


圖 23. 置於只有TPM-1細菌7天後清除碳鋼表面之SEM圖。
Figure 23 SEM micrograph of carbon steel immersed in TPM-1 bacteria solution for 7 days after ultrasonic cleaning.

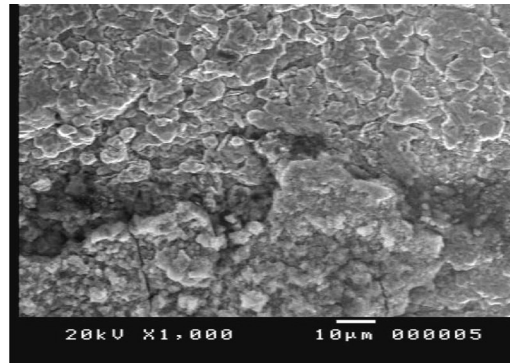


圖 24. 置於只有TPH-2細菌7天後清除碳鋼表面之SEM圖。
Figure 24 SEM micrograph of carbon steel immersed in TPH-2 bacteria solution for 7 days after ultrasonic cleaning.

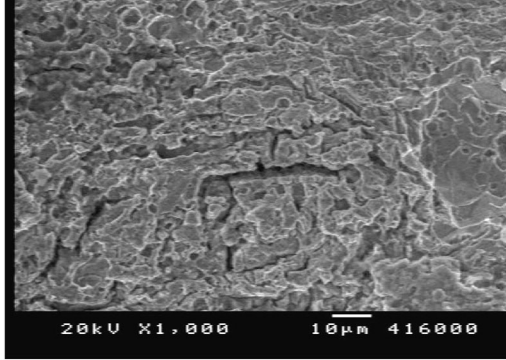


圖 25. 置於只有TPH-3細菌7天後清除碳鋼表面之SEM圖。
Figure 25 SEM micrograph of carbon steel immersed in TPH-3 bacteria solution for 7 days after ultrasonic cleaning.

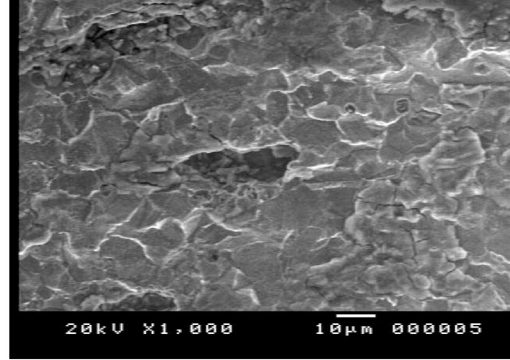


圖 26. 置於只有TPH-5-2細菌7天後清除碳鋼表面之SEM圖。
Figure 26 SEM micrograph of carbon steel immersed in TPM-5-2 bacteria solution for 7 days after ultrasonic cleaning.

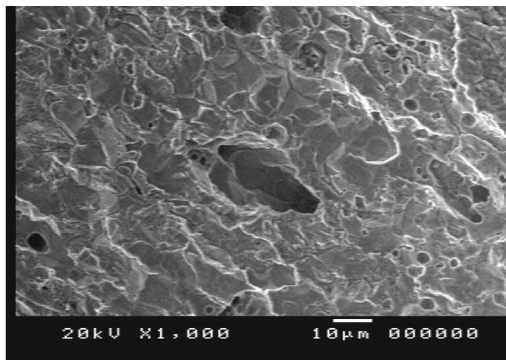


圖 27. 置於只有TPM-3細菌7天後清除碳鋼表面之SEM圖。
Figure 27 SEM micrograph of carbon steel immersed in TPM-3 bacteria solution for 7 days after ultrasonic cleaning.

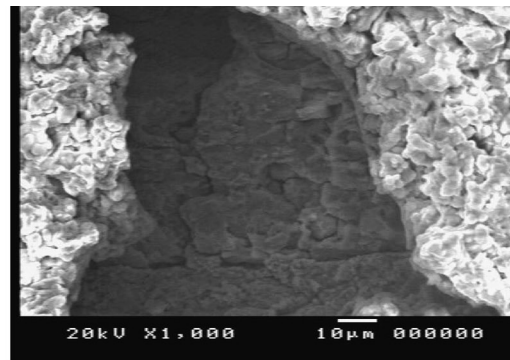


圖 28. 置於TPM-3細菌+抑制劑7天後清除碳鋼表面之SEM圖。
Figure 28 SEM micrograph of carbon steel immersed in TPM-3 bacteria solution with inhibitor added for 7 days after ultrasonic cleaning.

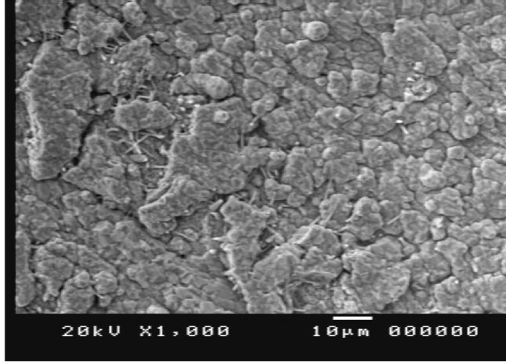


圖 29. 置於TPM-3細菌+抑制劑+殺菌劑7天後清除碳鋼表面之SEM圖。
Figure 29 SEM micrograph of carbon steel immersed in TPM-3 bacteria solution with inhibitor and bactericide added for 7 days after ultrasonic cleaning.

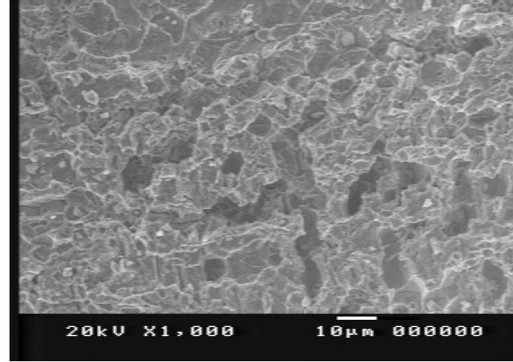


圖 30. 置於只有TPH-7細菌7天後清除碳鋼表面之SEM圖。
Figure 30 SEM micrograph of carbon steel immersed in TPH-7 bacteria solution with for 7 days after ultrasonic cleaning.

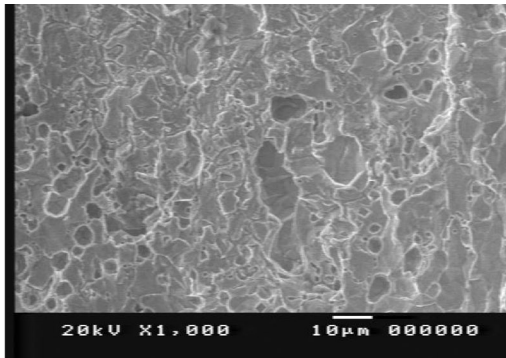


圖 31. 置於TPH-7細菌+抑制劑7天後清除碳鋼表面之SEM圖。
Figure 31 SEM micrograph of carbon steel immersed in TPH-7 bacteria solution with inhibitor added for 7 days after ultrasonic cleaning.

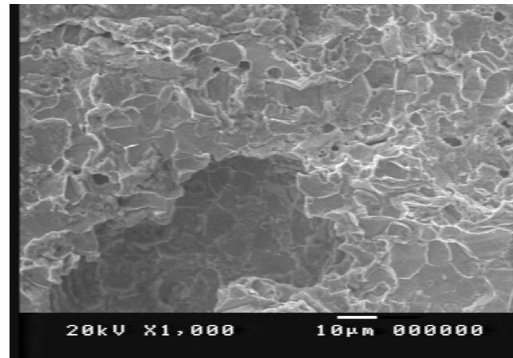


圖 32. 置於TPH-7細菌+抑制劑+殺菌劑7天後清除碳鋼表面之SEM圖。
Figure 32 SEM micrograph of carbon steel immersed in TPH-7 bacteria solution with inhibitor and bactericide added for 7 days after ultrasonic cleaning.