

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 化學科

030211

水線下的秘密—陰極防鏽

學校名稱：高雄市立楠梓國民中學

作者： 國二 黃寶儀 國二 蘇庭誼 國二 沈泓瀚	指導老師： 邱品樺 林念德
---	-----------------------------

關鍵詞：陰極防鏽、船舶防蝕、外加電流法

摘 要

為探討地下管線以及船隻的防鏽方式，設計實驗用鐵與活性大的鋅、鋁相接，還有外加直流電，長時間浸泡在三種環境(自來水、3%食鹽水、土壤)中，檢驗陰極防鏽效果。使用物理方法測量金屬質量和電位差變化；化學方法用黃血鹽、赤血鹽及硫氰化鉀，檢測鐵離子與亞鐵離子濃度隨時間的變化，並以檢量線定量。研究結論：

- 一、鋁在電解質濃度高的酸、鹼、鹽溶液中，陰極防鏽效果較好，鋅在電解質濃度低的溶液中，陰極防鏽效果較好。所以船隻與水中設施在淡水中適合用鋅防鏽，在海洋鹹水中適合用鋁來防鏽。
- 二、以外加直流電防鏽，鐵與鋅相接效果較好，地下管線適合用鋅片防鏽，但電解質濃度高的環境不適合外加電流陰極防鏽，否則陽極金屬會快速腐蝕。

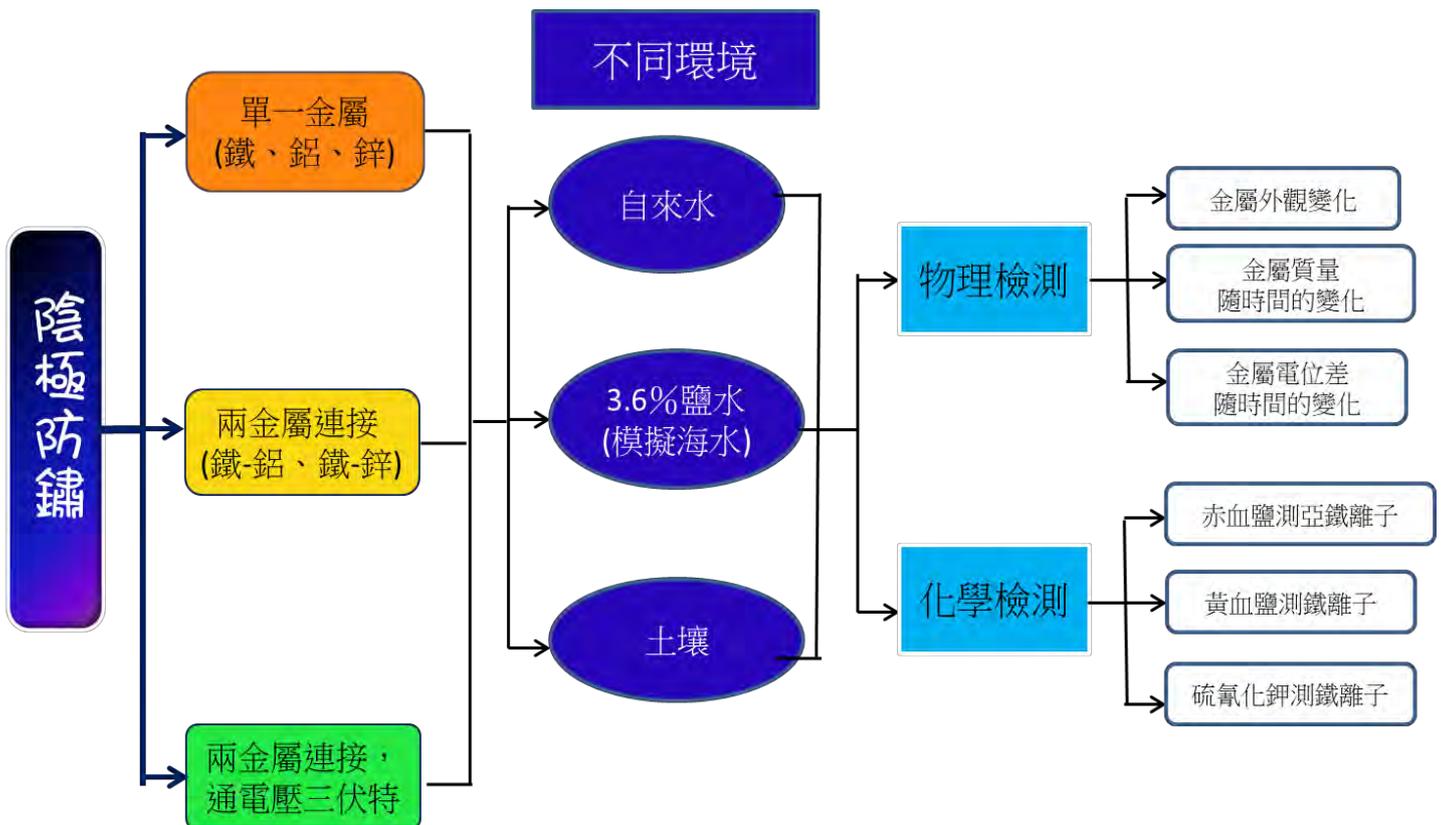
壹、研究動機

有天老師提出問題：「你們知道為什麼船泡在海裡不會生鏽嗎？」我們上網搜尋答案，才知道原來是加裝鋅塊，因為鋅的活性比鐵高，鋅會優先放出電子而被氧化，所以鋅是犧牲自己來保護鐵不被氧化。老師進一步告訴我們，2014年高雄發生的嚴重氣爆事故，事後調查為丙烯管線遭不當包覆於排水箱涵內，管線周圍被挖空無法外加電流防鏽，使管壁生鏽腐蝕，不能負荷輸送管內壓力而破損，導致運送中液態丙烯外洩，這讓我們對陰極防鏽更加好奇。

為了解防鏽的原理，老師先跟我們講解國二下學期理化的金屬活性與氧化還原，我們也設計相關實驗去探討不同的防鏽方法，更深入研究生活中陰極防鏽的應用。

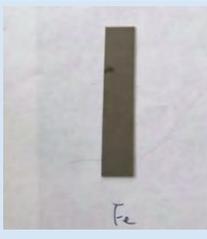
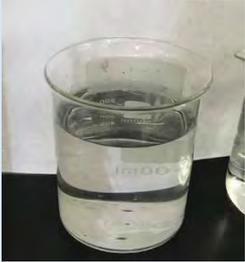
貳、研究目的

- 一、在三種環境(自來水、鹽水與土壤)進行實驗，模擬生活中環境對金屬氧化的影響。
- 二、利用鋁和鋅兩種活性比鐵大的金屬作為犧牲陽極，研究其防鏽效果與氧化反應。
- 三、主要以三種方式進行金屬(鐵、鋁、鋅)的陰極防蝕研究：
 - (一) 將鐵、鋁與鋅分別置入三種環境中作為對照組，觀察其生鏽氧化情形。
 - (二) 使用兩金屬直接連接(鐵-鋁、鐵-鋅)，模擬船隻於海上的防鏽方法。
 - (三) 兩金屬連接(鐵-鋁、鐵-鋅)通直流電 3.0V，模擬地下管線通直流電的陰極防蝕。
- 四、利用三種實驗方法，測量並觀察不同環境中金屬氧化情形：
 - (一) 稱量鐵、鋁與鋅隨時間的質量變化，並探討在不同環境中的氧化速率。
 - (二) 為方便取材，用硫氰化鉀、亞鐵氰化鉀(黃血鹽)與鐵氰化鉀(赤血鹽)檢測鐵、鐵-鋁、鐵-鋅浸泡的溶液中的鐵離子與亞鐵離子濃度隨時間的變化。
 - (三) 測量鐵-鋅及鐵-鋁兩金屬相接的電位差，了解金屬氧化造成電壓隨時間的變化。



圖一 研究大綱

參、研究設備及器材

刮勺	塑膠杯	樣品瓶	燒杯
			
鋅片	鋁片	鐵片	學校的土壤
			
三用電表	淡水(自來水)	鱷魚夾整流器	電子天平
			

表一、研究器材

亞鐵氰化鉀 (黃血鹽)	鐵氰化鉀 (赤血鹽)	食鹽	硫氰化鉀	1M 氫氧化 鈉	1M 鹽酸
					

表二、研究藥品

肆、研究原理

一、鐵生鏽的原理

鐵的生鏽是一種**電化學反應**，反應的第一步是**鐵將電子轉移到氧**。生鏽速度會受水影響，也會因為**電解質**存在而加速。例如汽車在有鹽的環境較容易生鏽。

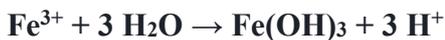
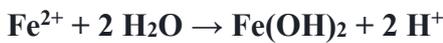
生鏽主要反應是**氧的還原**： $O_2 + 4 e^- + 2 H_2O \rightarrow 4 OH^-$

由於反應產生氫氧根離子，所以**酸會加速此反應的進行**。

同時進行以下氧化反應，**將鐵氧化為亞鐵離子**： $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2 e^-$

若有氧的存在，**亞鐵離子還會再度氧化**： $4 Fe^{2+} + O_2 \rightarrow 4 Fe^{3+} + 2 O^{2-}$

亞鐵離子和鐵離子和水會產生酸鹼反應，形成**氫氧化鐵**及**氫氧化亞鐵**：



最後氫氧化鐵及氫氧化亞鐵會和其脫水物形成以下的平衡：



依以上反應式，可看出**鐵生鏽會受到氧和水的影響**。若**溶氧量有限**，較容易產生含**亞鐵離子**的產物，例如**氧化亞鐵**及黑色的**四氧化三鐵**。若**溶氧量高**，則會產生**鐵離子**的產物，其化學式為 $Fe(OH)_{3-x}Ox/2$ 。由於鐵鏽中固體仍在緩慢進行化學反應，鐵鏽的成份會隨時間變化。

二、防鏽方法

(一) 水中設施與船舶的防鏽

船貼上**活性比鐵大的鋅金屬**，能使被保護的鋼鐵成為陰極反應區，降低鐵的溶出速率。**活性大的鋅塊則成為被犧牲的陽極反應區**而越來越薄，因此鋅塊需要定期更換。這種藉由**犧牲陽極（鋅、鋁、鎂）來保護陰極（鐵）**的方法稱為「**犧牲陽極的陰極保護法**」，此種保護法可見於船舶、水中設施、地下設施等。

(二) 地下管線的防鏽

地下管路大多是採用「**外加電流法**」，以**直流電源透過數個活性比鐵大的電極將電子供給受保護的鐵金屬**，使其成為電池中之陰極而能防蝕。

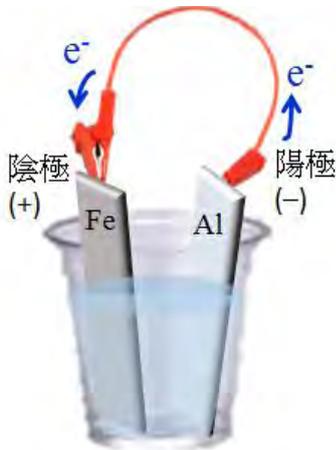
伍、實驗設計

➤ 選用鋅片及鋁片作為犧牲陽極的原因：

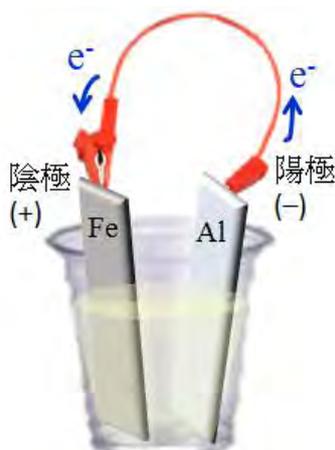
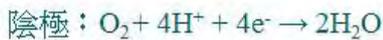
- 一、選擇**活性比鐵大的金屬**，且反應性不過高較安定（去除鹼金屬與鹼土金屬）。
- 二、**解離的金屬陽離子毒性較低**（去除鉻、錳等），減少環境污染。
- 三、**方便容易取得**，且成本較低能廣泛應用。
- 四、**參考文獻**一般使用**鋅鋁合金**，所以研究鋅片及鋁片各自作為犧牲陽極的防鏽效果。

➤ 實驗裝置設計：

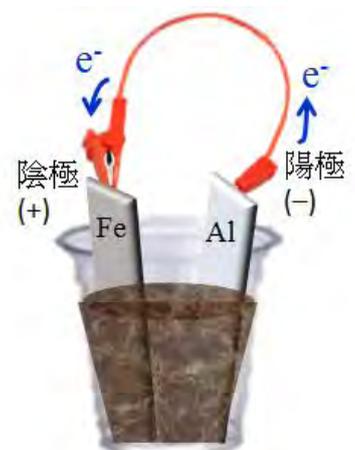
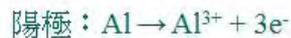
一、 兩金屬直接連接 (鐵-鋁) 在自來水、鹽水與土壤的裝置與反應



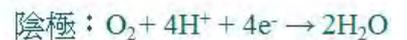
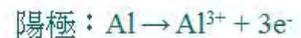
自來水



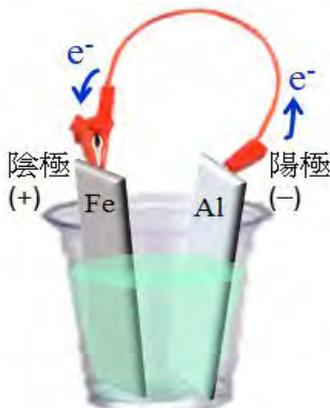
食鹽水



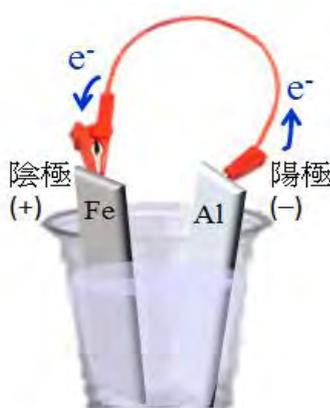
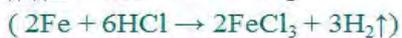
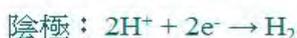
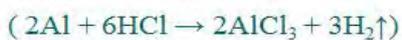
土壤



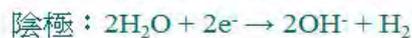
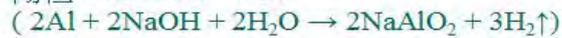
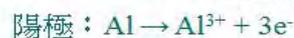
二、 兩金屬直接連接 (鐵-鋁) 在酸與鹼溶液中的裝置與反應



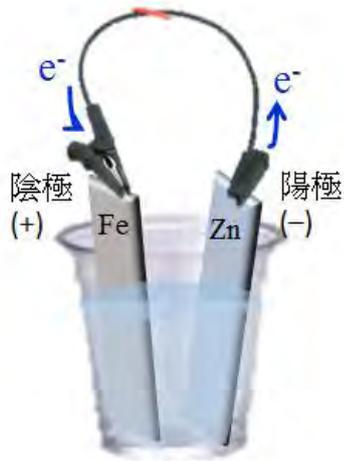
HCl溶液



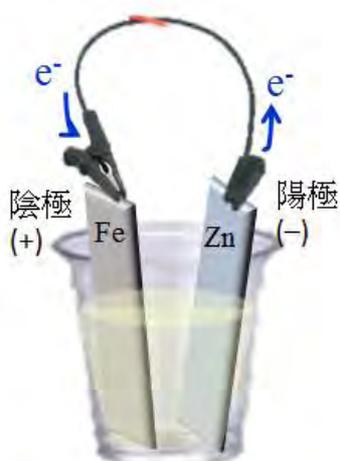
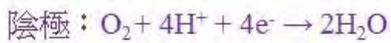
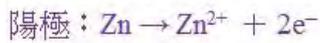
NaOH溶液



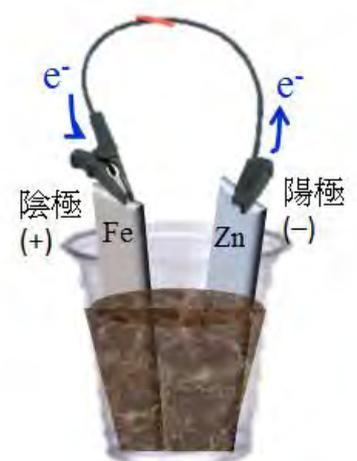
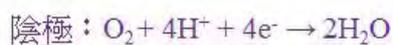
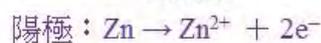
三、 兩金屬直接連接 (鐵-鋅) 在自來水、鹽水與土壤的裝置與反應



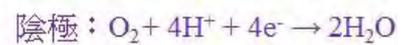
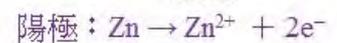
自來水



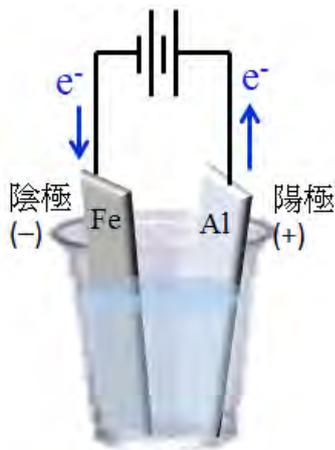
食鹽水



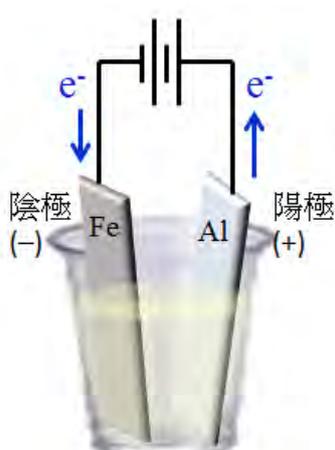
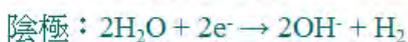
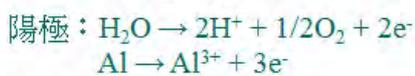
土壤



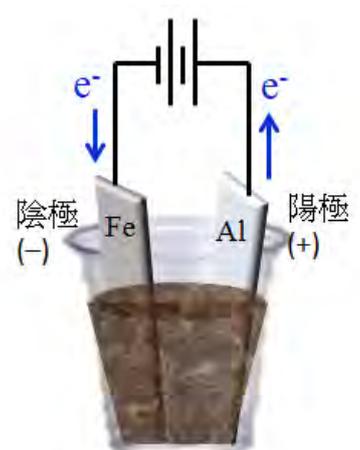
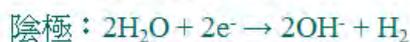
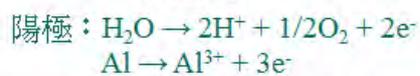
四、 兩金屬連接通直流電 3.0V (鐵-鋁) 在自來水、鹽水與土壤的裝置與反應



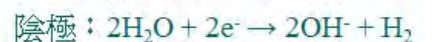
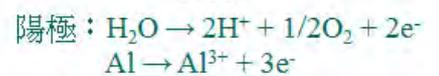
自來水



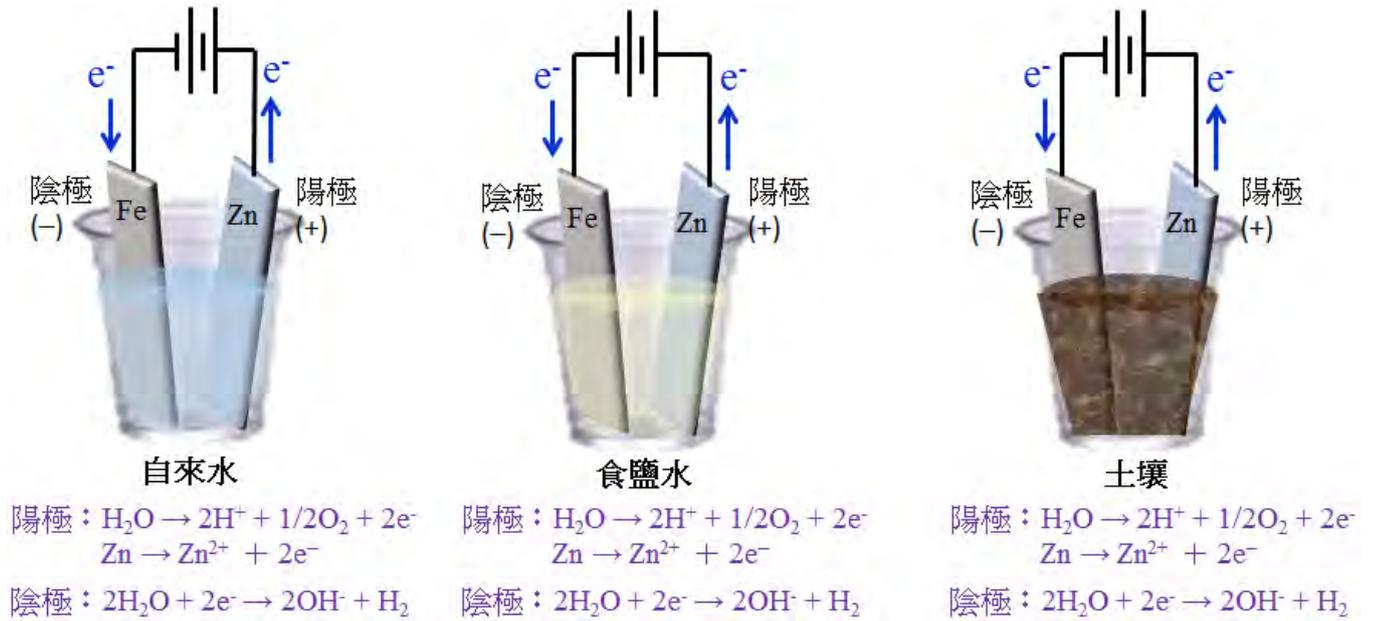
食鹽水



土壤



五、 兩金屬連接通直流電 3.0V (鐵-鋅) 在自來水、鹽水與土壤的裝置與反應



陸、研究方法與步驟

➤ 實驗裝置測試與改良：

1. 使用透明膠帶黏貼單芯線與金屬片，進行陰極防鏽線路的裝設。
2. 以 1.5 V 電池進行陰極防鏽通直流電，同樣使用膠帶黏貼電池與單芯線。



➤ 失敗結果與問題：

1. 膠帶碰水後黏性降低，且難緊密貼合單芯線與電池，易形成斷路無法通電，造成鐵片生鏽。
2. 考慮電池電壓可能無法長期保持穩定不變。

➤ 改良方法：

1. 使用鱷魚夾穩固連接金屬片，並注意鱷魚夾金屬不可碰觸溶液或土壤，避免發生反應。
2. 改用整流器提供穩定電壓，進行陰極防鏽實驗。



一、物理方法---觀察金屬外觀與溶液的變化

(一) 三種條件浸泡鋅、鋁、鐵，觀察其外觀變化

1. **各金屬在三種環境中的氧化情形**：取自來水、3%食鹽水及學校土壤，分別裝入樣品瓶內，將鋅、鋁、鐵金屬片個別放入溶液與土壤中。



2. **兩金屬相接在三種環境中的氧化情形**：取自來水、3%食鹽水及學校土壤，分別裝入塑膠杯內，用鱷魚夾將鐵-鋁、鐵-鋅接好放入溶液與土壤中，並用膠帶固定避免金屬片接觸。



✧ 我們發現水浸泡鐵-鋁中鐵會生鏽，所以多做了鐵-鋁放在酸和鹼溶液的實驗測試。

3. **兩金屬相通直流電 3.0 V 在三種環境中的氧化情形**：

取自來水、3%食鹽水及學校土壤，分別裝入塑膠杯內，用鱷魚夾將鐵-鋁、鐵-鋅接好通直流電 3.0V，鐵片接到負極，鋁片與鋅片接到正極，接好後放入溶液與土壤中，並用膠帶固定避免金屬片接觸。

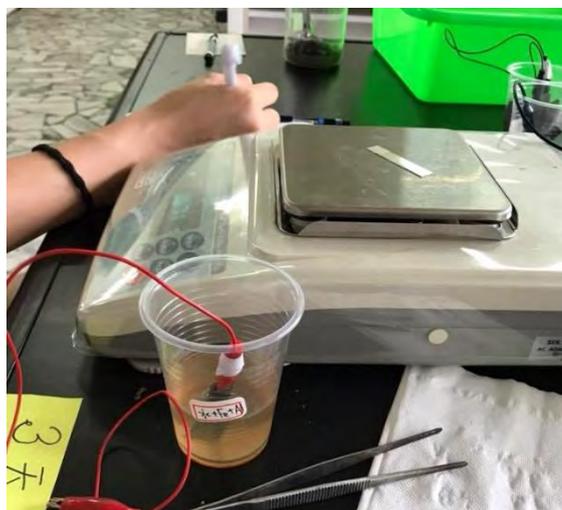


✧ 鐵-鋁、鐵-鋅相接在食鹽水中通直流電 3.0 V，會使鋁片和鋅片快速腐蝕溶出，故改為短時間每 30 分鐘觀察反應，沒有長時間測量。

4. 檢驗上述步驟 1~3 中金屬表面的生鏽情況，拍照記錄 1~7 天、30 天的金屬與溶液狀態。

(二) 三種條件浸泡鋅、鋁、鐵的質量隨時間變化

- 將上述步驟三種條件的各金屬片用鑷子夾出，並擦拭表面殘留的溶液或土壤。
- 以電子天平稱量並記錄其 1~7 天、30 天的金屬質量變化。

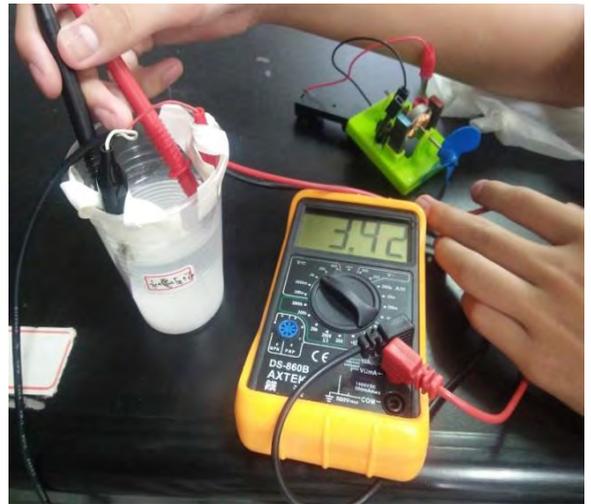


圖二、稱量金屬片質量

(三) 三種環境浸泡的兩金屬電位差隨時間變化

1. 將上述步驟兩金屬相接 (鐵-鋁、鐵-鋅) 在三種環境中的各金屬片用鑷子夾出，並擦拭表面殘留的溶液或土壤。
2. 用三用電表測量其 1~7 天、30 天的兩金屬 (鐵-鋁、鐵-鋅) 電位差變化。

圖三、測量兩金屬相接的電壓

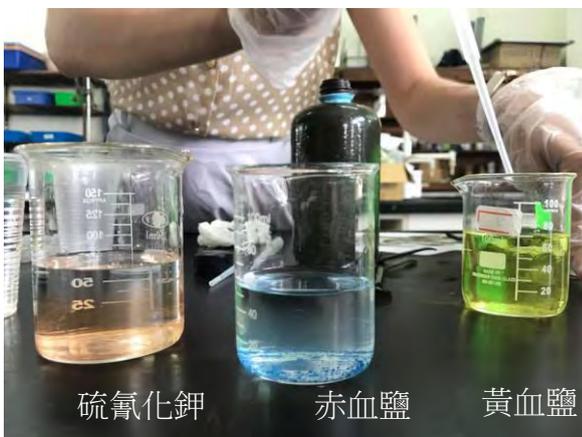


二、化學方法-利用化學試劑檢驗金屬反應生成亞鐵離子與鐵離子

(一) 利用硫氰化鉀 $KSCN$ 、亞鐵氰化鉀(黃血鹽) $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ 、鐵氰化鉀(赤血鹽)

$K_3[Fe(CN)_6]$ ，分別檢驗樣品溶液中的鐵離子 Fe^{3+} 與亞鐵離子 Fe^{2+}

1. 配製硫氰化鉀、亞鐵氰化鉀(黃血鹽)、鐵氰化鉀(赤血鹽)溶液。
2. 取上述步驟浸泡金屬片的自來水與食鹽水溶液，吸取 2 毫升樣品溶液加入樣品瓶。
3. 吸取 1 毫升的稀釋鹽酸加入樣品瓶，使酸與鐵鏽反應產生鐵離子與亞鐵離子。
4. 加入稀釋過的鐵氰化鉀(赤血鹽)、亞鐵氰化鉀(黃血鹽)及硫氰化鉀溶液各 1 毫升，檢驗反應的顏色變化，觀察並拍照紀錄。
5. 重複上述步驟 1~4，拍照紀錄 1~7 天及 30 天的溶液顏色變化。
6. 配標準濃度的 $FeCl_3$ 與 $FeCl_2$ 溶液製作檢量線，進行樣品中 Fe^{3+} 與 Fe^{2+} 的定量檢測。



圖四、三種化學藥品調配



圖五、化學藥品測量結果

柒、結果分析

一、物理方法 – 以三種條件浸泡金屬片的外觀變化、質量變化及電位差變化

(一)各金屬(鋅、鋁、鐵)在三種環境中的氧化情形

表三、金屬 1~7 天外觀變化

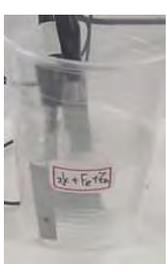
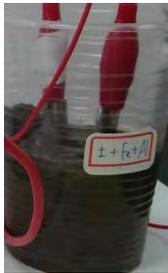
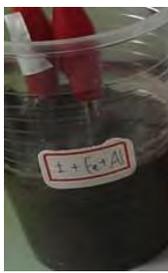
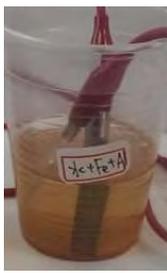
	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天
鋅 — 土							
鋅 — 鹽水							
鋅 — 水							
鋁 — 土							
鋁 — 鹽水							

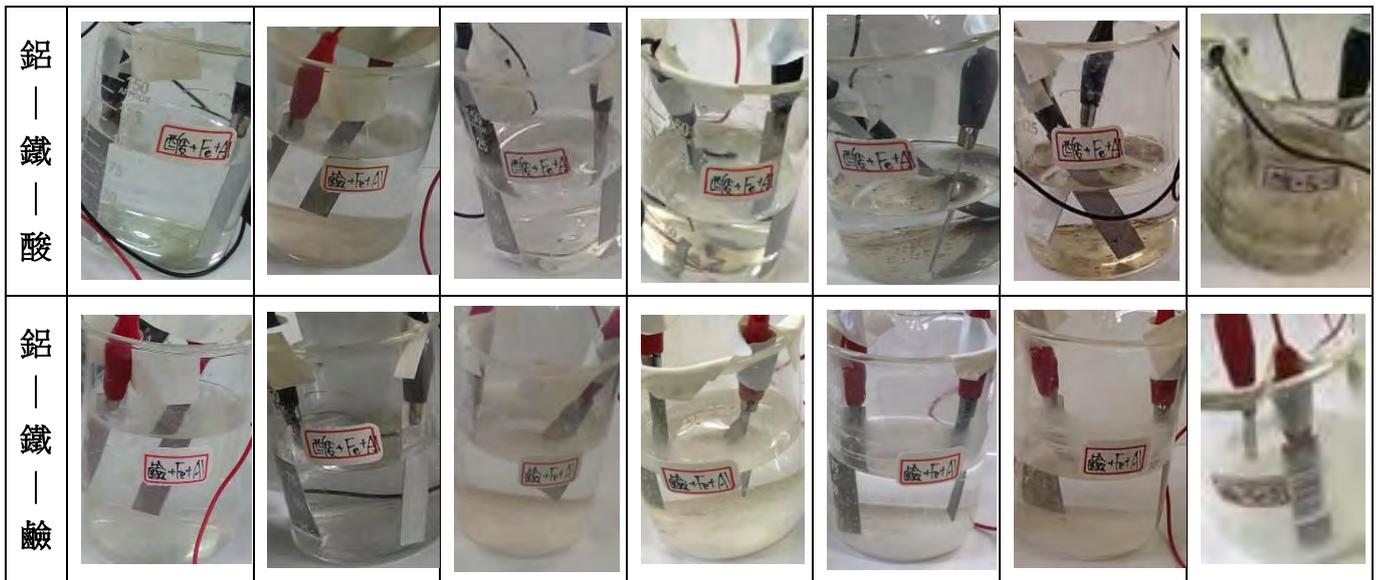
鋁 — 水							
鐵 — 土							
鐵 — 鹽水							
鐵 — 水							

1. 鋁片和鋅片在自來水、3%食鹽水及土壤中表面生成緻密氧化層(氧化鋁和氧化鋅)，保護內部不會鏽蝕，且溶液顏色仍為透明無色。
2. 鐵片在電解質濃度高的鹽水中最容易生鏽，其次是在自來水中，土壤中也會生鏽但時間較長，顯示鐵生鏽主要是與水和氧氣反應，且電解質利於氧化還原反應。
3. 自來水與食鹽水中溶氧量有限，易產生含亞鐵離子的產物，例如氧化亞鐵及黑色的四氧化三鐵。
4. 土壤中與氧氣接觸面積大，則會產生鐵離子的產物，其化學式為 $\text{Fe}(\text{OH})_{3-x}\text{O}_x$ 。

(二)兩金屬相接 (鐵-鋁、鐵-鋅) 在三種環境中的氧化情形

表四、兩金屬外觀變化

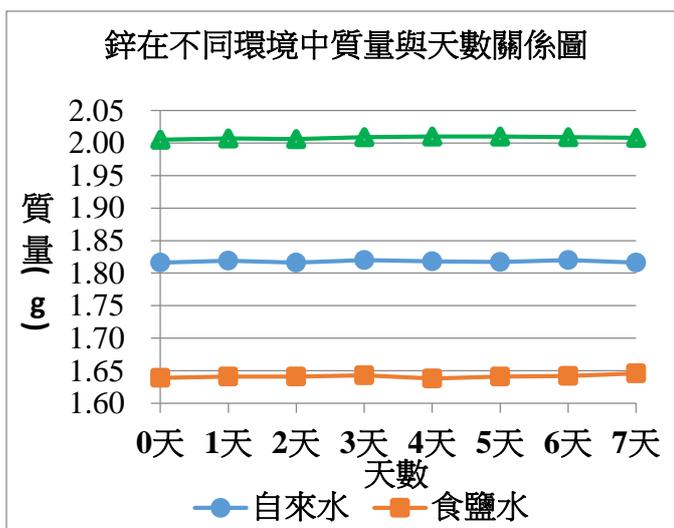
	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天
鋅—鐵—土							
鋅—鐵—鹽水							
鋅—鐵—水							
鋁—鐵—土							
鋁—鐵—鹽水							
鋁—鐵—水							



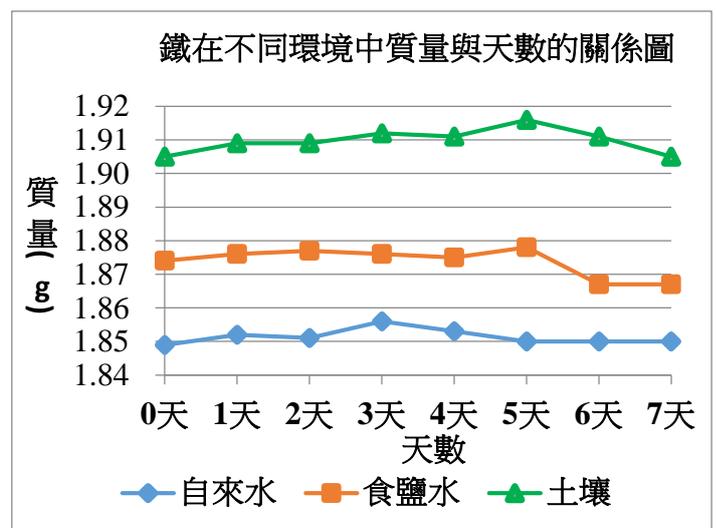
1. 由實驗結果可發現在自來水中陰極防鏽效果較好的是鐵和鋅兩金屬相接，鋅可作為犧牲陽極保護陰極的鐵，減緩鐵生鏽，到第 7 天才有較明顯的紅棕色鐵鏽產生。
2. 3%食鹽水中陰極防鏽效果較好的是鐵和鋁兩金屬相接，鋁可作為犧牲陽極保護陰極的鐵，減緩鐵生鏽，到第 7 天仍沒有紅棕色鐵鏽產生。
3. 鋁在電解質濃度高的酸與鹼溶液中，也可作為犧牲陽極保護陰極的鐵，減緩鐵生鏽，酸到第 5 天才有紅棕色鐵鏽產生；鹼中則沒有鐵鏽，有白色的氫氧化鋁沉澱。

(三) 三種條件浸泡金屬(鋅、鋁、鐵)質量隨時間的變化

1. 各金屬在三種環境中的質量變化



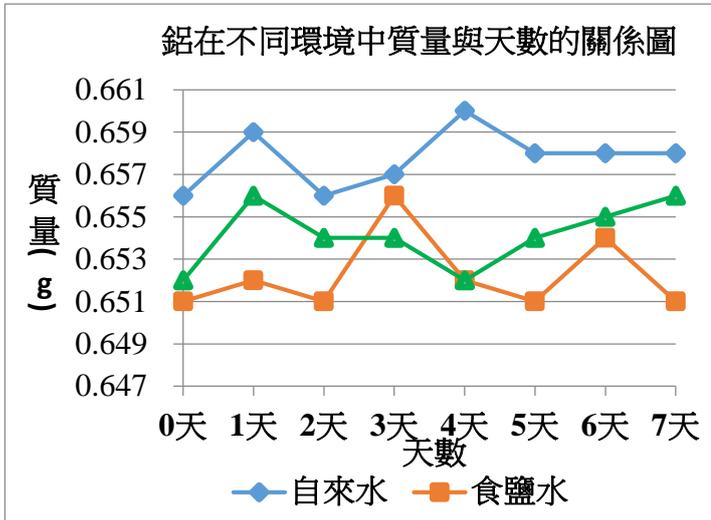
圖六 鋅在不同環境中質量與天數的關係圖



圖七 鐵在不同環境中質量與天數的關係圖

鋅片在溶液與土壤中質量幾乎不變，因為鋅在自來水、3%食鹽水及土壤中表面生成緻密氧化層(氧化鋅 ZnO)，保護內部不會鏽蝕，故質量不再變化。

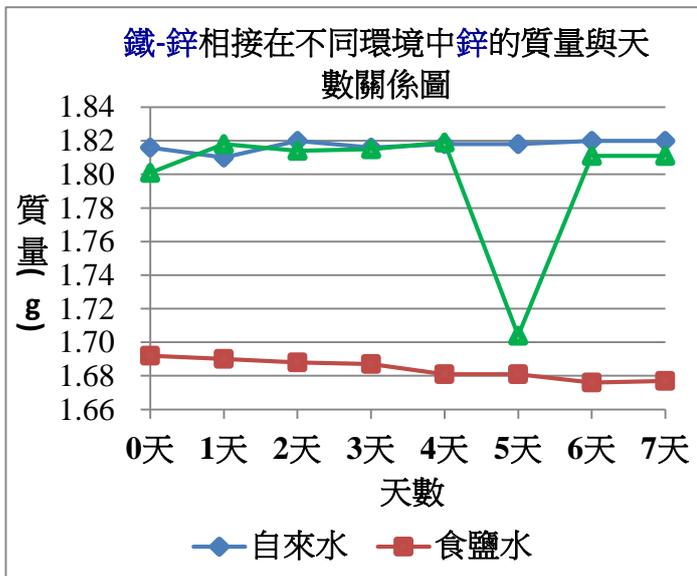
鐵在環境中會因為產生氧化鐵($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$)而質量稍增，但是又因為 3~5 天鐵鏽脫落掉入溶液，所以質量減少。



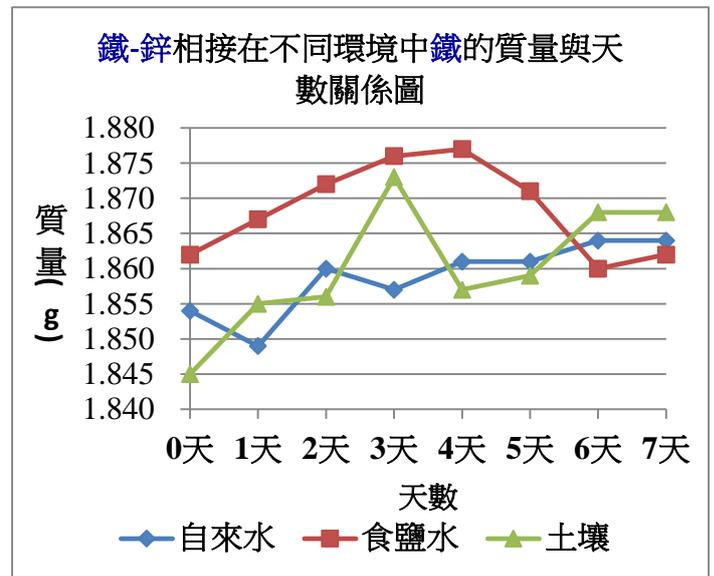
圖八 鋁在不同環境中質量與天數的關係圖

鋁片在溶液與土壤中只有些微的質量改變，鋁片在自來水、3%食鹽水及土壤中表面生成緻密氧化層(氧化鋁 Al_2O_3)，保護內部不會鏽蝕，故質量不再變化。

2. 兩金屬相接在三種環境中的質量變化



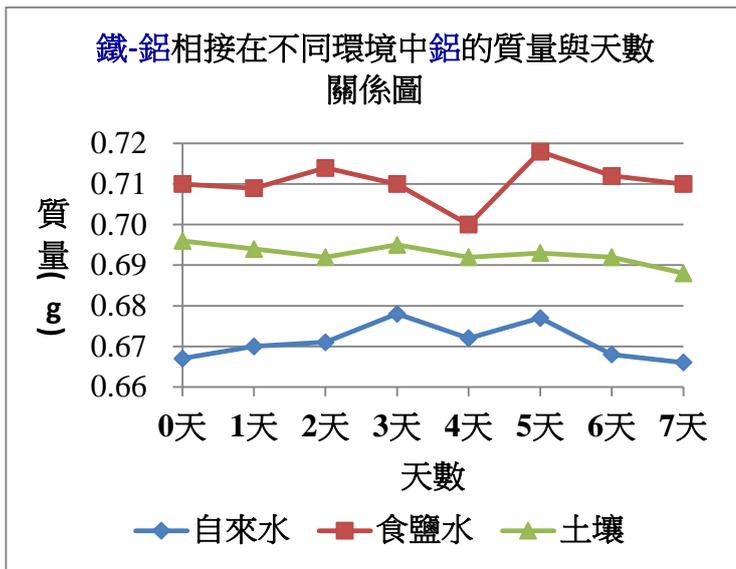
圖九 鐵-鋅相接中鋅的質量與天數關係圖



圖十 鐵-鋅相接中鐵的質量與天數關係圖

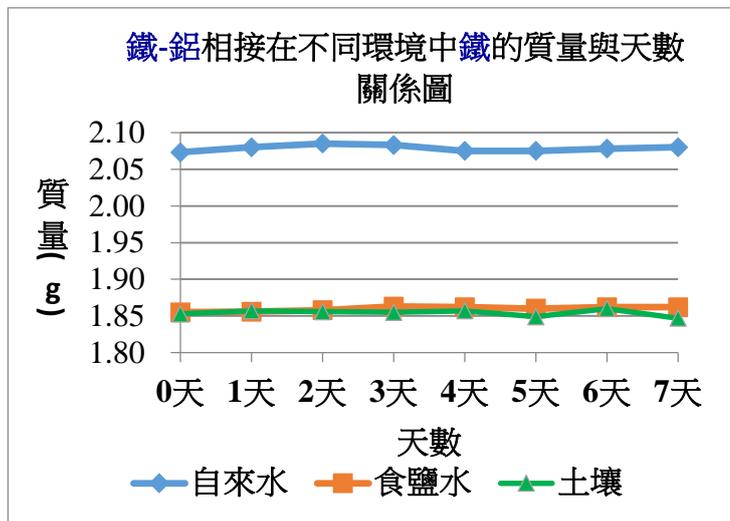
鋅在溶液中質量有減少的趨勢，因為鋅會進行氧化反應 $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^{-}$ 解離出鋅離子而使鋅片質量減少，作犧牲陽極使陰極的鐵減緩生鏽。

我們發現鐵到後來幾天質量有增加，代表仍有生鏽情況發生只是較慢。



圖十一 鐵-鋁相接在不同環境中鋁的質量與天數關係圖

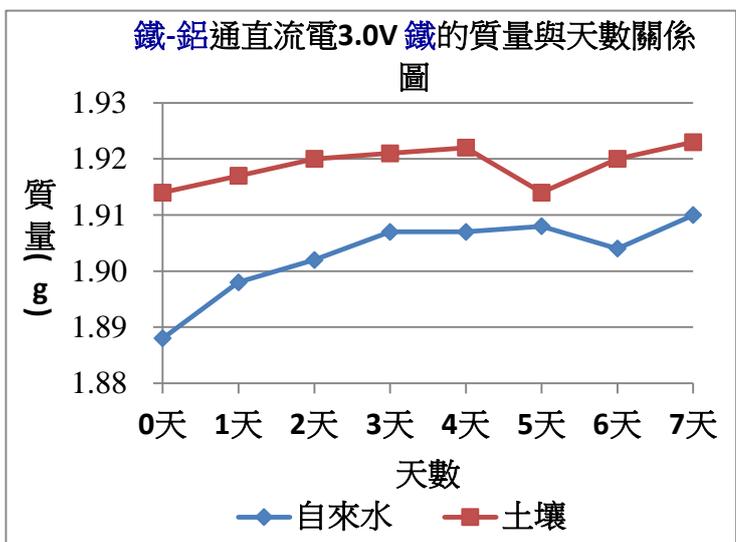
鋁在溶液中會進行氧化反應 $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ 解離出鋁離子，作犧牲陽極使陰極的鐵減緩生鏽，實驗結果發現鋁的質量幾乎不變，可能是部分解離至溶液中，部分生成氧化物沉積於鋁片表面。



圖十二 鐵-鋁相接在不同環境中鐵的質量與天數關係圖

我們發現鐵到後來幾天質量有增加，代表仍有生鏽情況發生只是較慢。

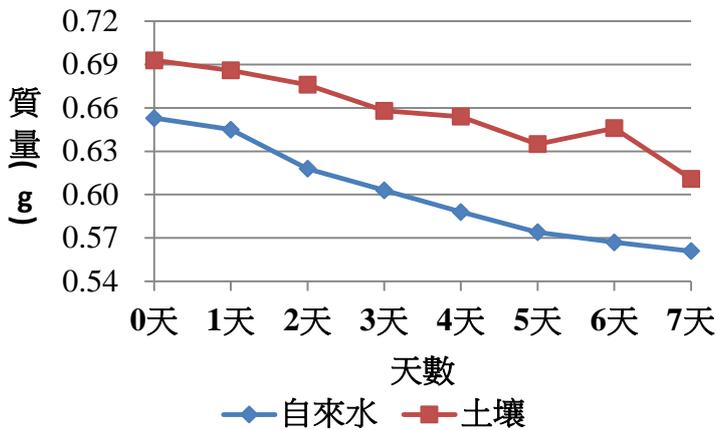
3. 兩金屬相接通直流電 3.0 V 在三種環境中的質量變化



圖十三 鐵-鋁通直流電 3.0V 鐵的質量與天數關係圖

我們發現鐵-鋁相接接通直流電，鐵的質量變化不大，但外觀有生鏽情形，可能因為部分生鏽且鐵鏽脫落，造成質量些微上升。鐵接到電源負極，接受電子產生還原反應而減緩鐵的氧化。

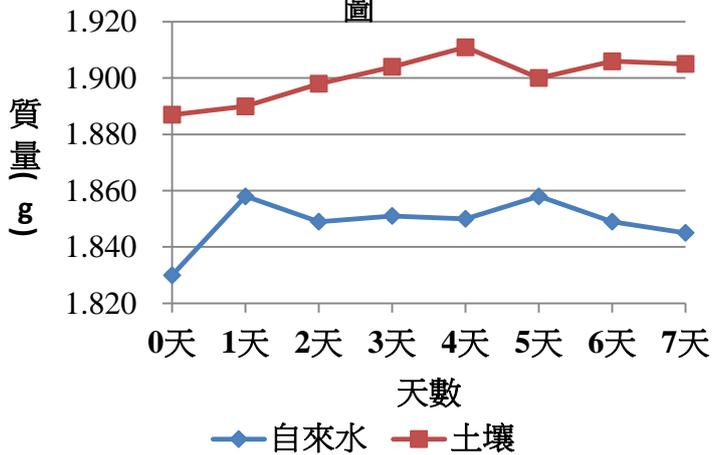
鐵-鋁通直流電3.0V 鋁的質量與天數關係圖



圖十四 鐵-鋁通直流電3.0V 鋁的質量與天數關係圖

鐵-鋁通直流電，鋁接到電源正極氧化失去電子 $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$ ，作為犧牲陽極使鐵減緩生鏽，可觀察到鋁片上有許多地方斷裂，導致質量減少非常多。

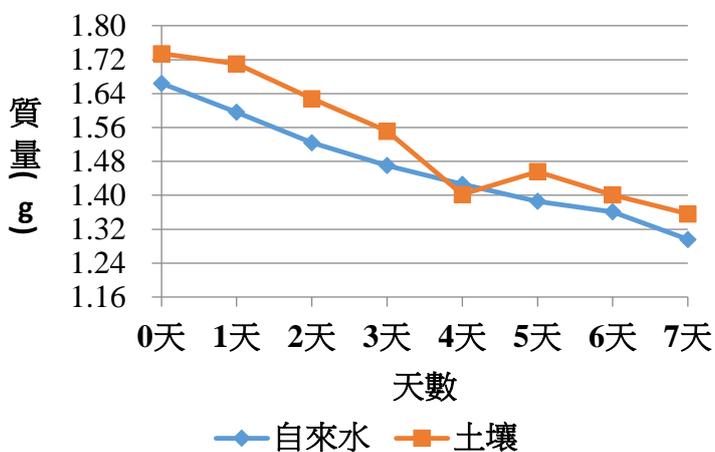
鐵-鋅通直流電3.0V 鐵的質量與天數關係圖



圖十五 鐵-鋅通直流電3.0V 鐵的質量與天數關係圖

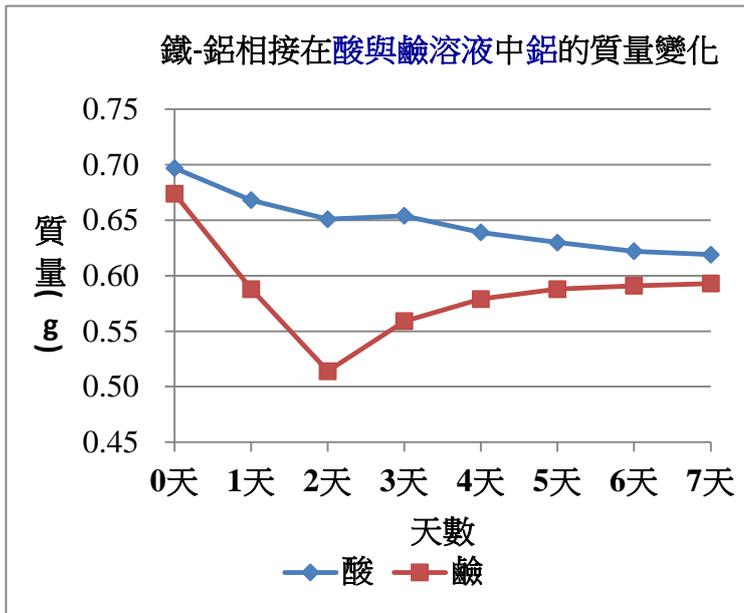
鐵的質量變化不大，鐵接到電源負極，接受電子產生還原反應，而減緩鐵的生鏽。

鐵-鋅通直流電3.0V 鋅的質量與天數關係圖



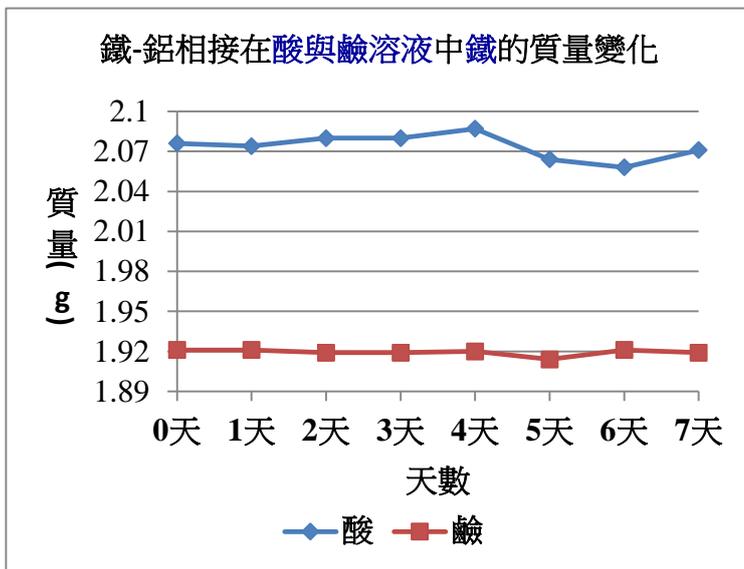
圖十六 鐵-鋅通直流電3.0V 鋅的質量與天數關係圖

鋅和鐵相接通直流電，鋅接到電源正極，所以產生明顯的氧化反應解離出鋅離子 $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^{-}$ ，使鋅片上有些微的地方斷裂，導致質量減少明顯。



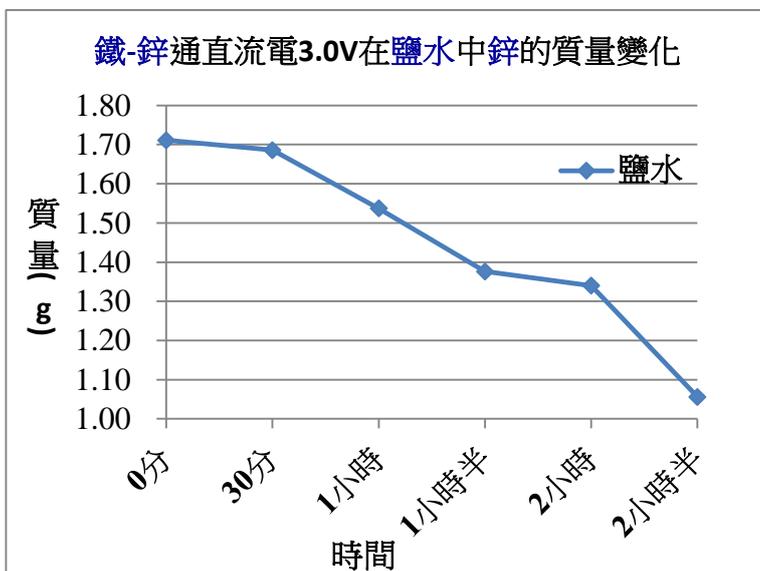
圖十七 鐵-鋁相接在酸與鹼溶液中鋁的質量變化

鐵-鋁相接在自來水中，鋁無法持續氧化來保護鐵不生鏽，而在食鹽水中則有防鏽效果，所以我們增加酸 HCl 與鹼 NaOH 溶液來實驗看結果，可發現鋁在電解質濃度高的酸與鹼溶液中，可作為犧牲陽極保護陰極的鐵，鋁氧化失去電子 $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ ，使鋁片質量減少。



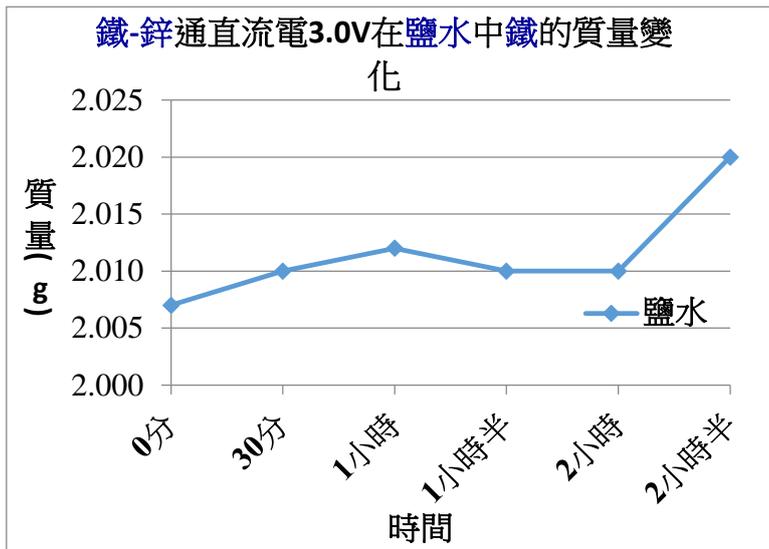
圖十八 鐵-鋁相接在酸鹼中鐵的質量變化

鐵片上接受電子產生還原反應，減緩鐵的生鏽，故質量幾乎不變。



圖十九 鐵-鋅通直流電 3.0V 在鹽水中每 30 分鐘鋅的質量變化

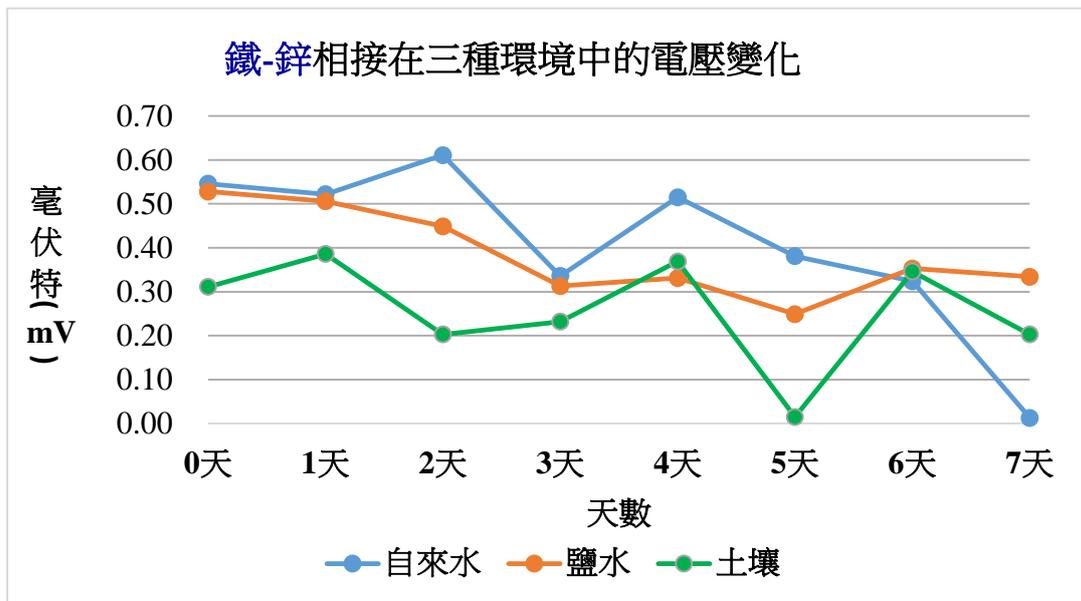
鐵-鋅相接在食鹽水中通直流電 3.0 V，會使鋅片快速腐蝕溶出，故我們改以每 30 分鐘測一次金屬質量，但由於氧化反應 $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ 太劇烈，所以鋅有部分斷裂，鋅片質量明顯下降。



圖二十 鐵-鋅通直流電 3.0V 在鹽水中每 30 分鐘鐵的質量變化

鐵的質量變化不大，鐵接到電源負極，接受電子產生還原反應，而減緩鐵的生鏽。

(四) 兩金屬相接電位差隨時間的變化

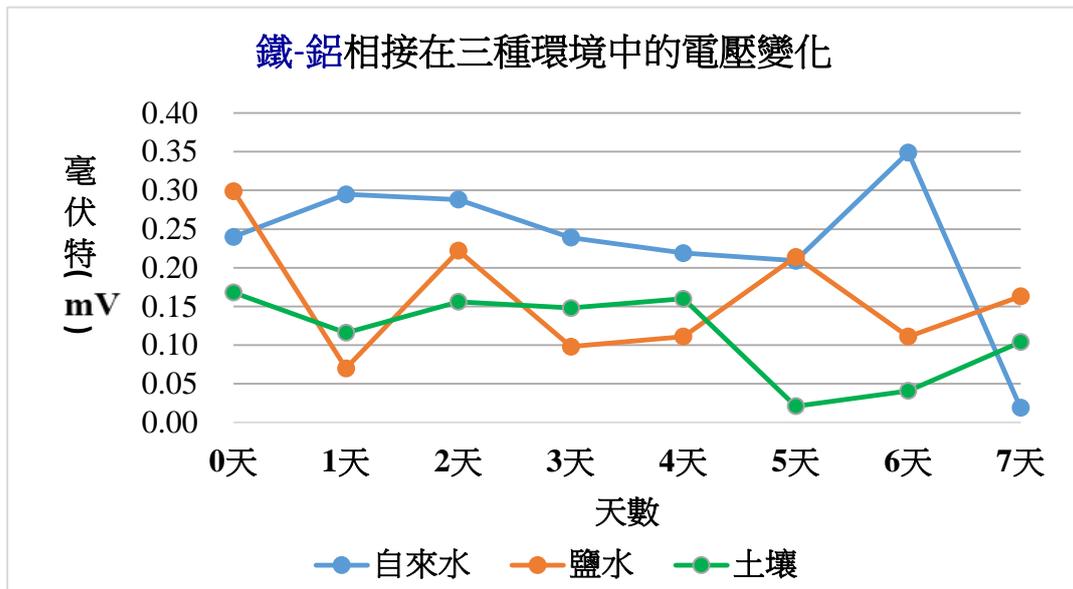


圖二十一 鐵-鋅相接在三種環境中的電壓變化

實驗結果發現電壓不穩定，但可發現電壓有下降趨勢。鐵-鋅電化電池正負極主反應的標準電極電位為：負極 (陽極) $Zn \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2e^-$ $E^\circ = + 0.7618 V$



因溶液與土壤中有其他副反應，所以測到電壓非標準電極電位差，金屬表面隨時間而有氧化等其他產物造成電壓下降。在自來水中電壓下降最多，且陰極防鏽效果較好，推測是鋅片氧化程度較高影響電極反應。

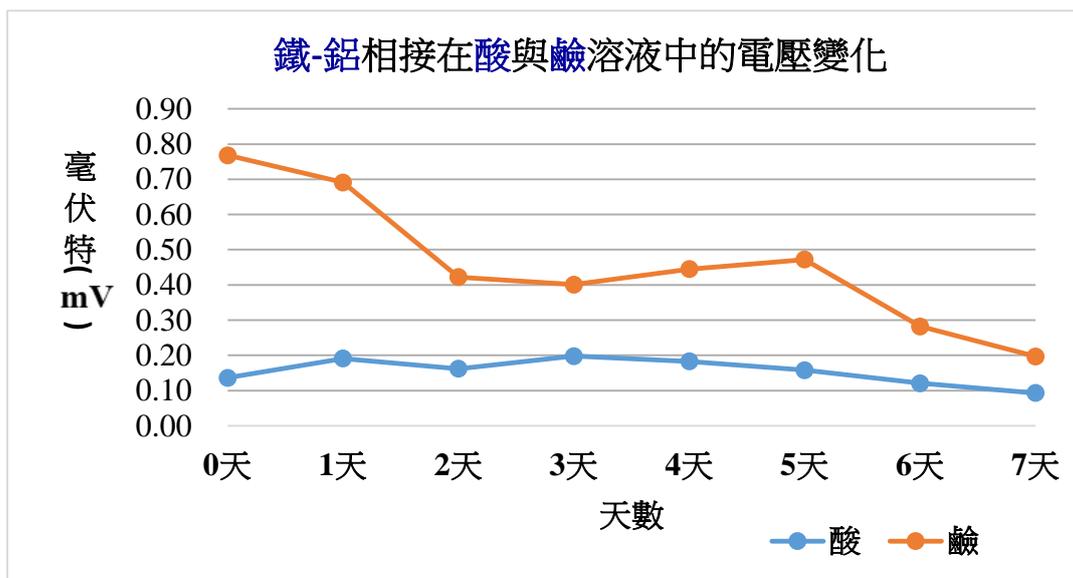


圖二十二 鐵-鋁相接在三種環境中的電壓變化

實驗結果發現電壓不穩定，但可發現電壓有下降趨勢。鐵-鋁電化電池正負極主反應的標準電極電位為：負極 (陽極) $Al \rightleftharpoons Al^{3+} + 3e^-$ $E^\circ = +1.66 V$



因溶液與土壤中有其他副反應，所以測到電壓非標準電極電位差，金屬表面隨時間而有氧化等其他產物造成電壓下降。在電解質鹽水中電壓下降最多，且陰極防鏽效果較好，推測是鋁片氧化程度較高影響電極反應。



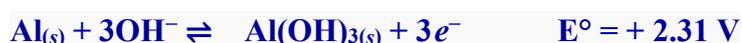
圖二十三 鐵-鋁相接在酸鹼中的電壓變化

實驗結果發現電壓不穩定，但可發現電壓有下降趨勢。鐵-鋁電化電池正負極主反應的標準電極電位為：負極 (陽極) $\text{Al} \rightleftharpoons \text{Al}^{3+} + 3e^-$ $E^\circ = + 1.66 \text{ V}$



因溶液中有其他副反應，所以測到電壓非標準電極電位差，金屬表面隨時間而有氧化等其他產物造成電壓下降。鋁在酸與鹼電解質溶液中較易氧化，防鏽效果較好。

鋁在鹼性 NaOH 溶液中，主要有以下兩個反應影響鐵鋁電化電池的電位差，且溶液有白色沉澱物生成： $\text{Al}_{(s)} + 4\text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Al}(\text{OH})_4^- + 3e^-$ $E^\circ = + 2.33 \text{ V}$

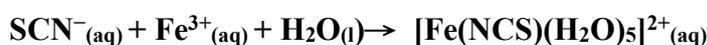


二、化學方法 – 利用化學試劑檢驗金屬反應生成鐵離子 Fe^{3+} 與亞鐵離子 Fe^{2+}

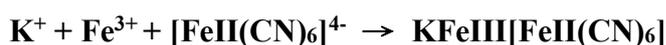
(一) 定性分析

本實驗用以檢驗鐵離子 Fe^{3+} 是硫氰化鉀 KSCN 和亞鐵氰化鉀(黃血鹽)，而檢驗亞鐵離子 Fe^{2+} 的是鐵氰化鉀 (赤血鹽)。

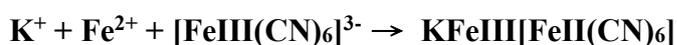
硫氰根離子 SCN^- 與鐵離子 Fe^{3+} ，會反應生成血紅色的 $[\text{Fe}(\text{NCS})(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$ ，反應式如下：



亞鐵氰化鉀 $[\text{FeII}(\text{CN})_6]^{4-}$ 與鐵離子 Fe^{3+} 反應產生普魯士藍 $\text{K}[\text{FeIII}\text{FeII}(\text{CN})_6]$ ，反應式如下：

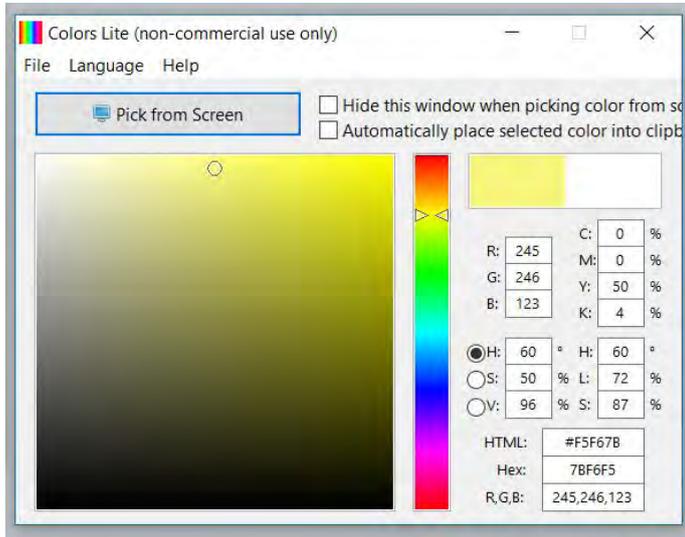


鐵氰化鉀 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 遇到亞鐵離子 Fe^{2+} 會產生普魯士藍 $\text{K}[\text{FeIII}\text{FeII}(\text{CN})_6]$ ，反應式如下：

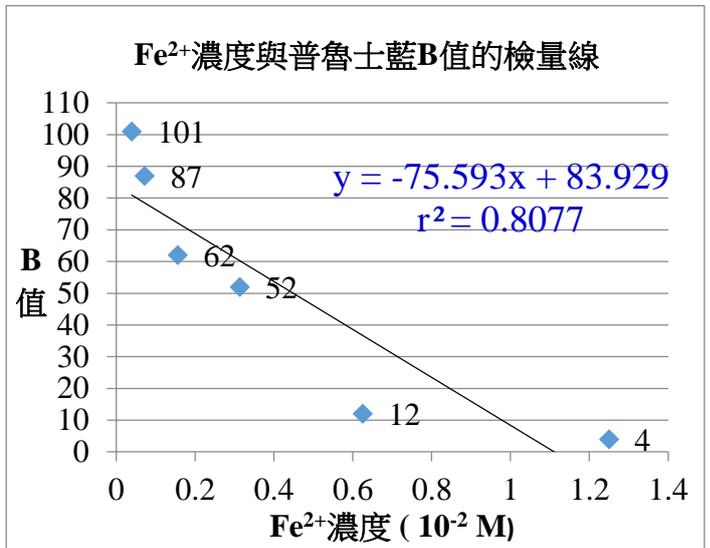
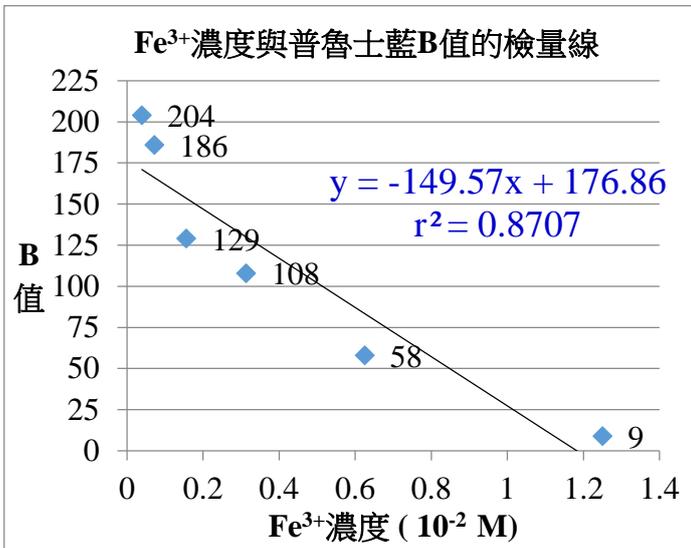
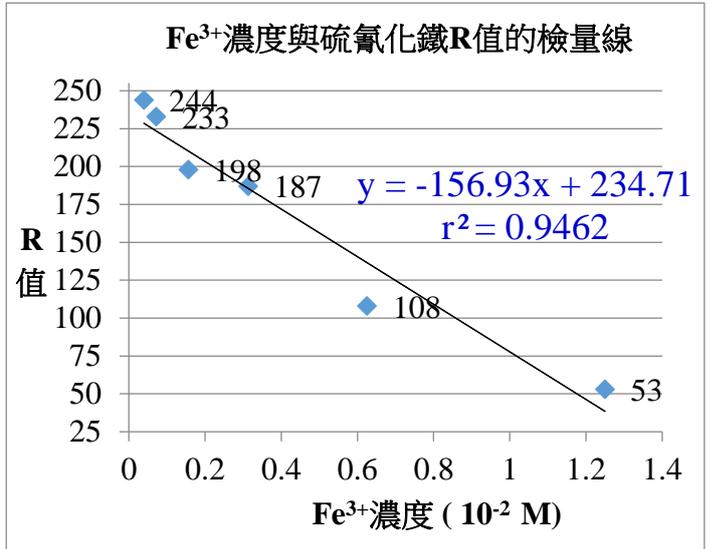


(二) 定量分析

1. 配標準濃度的 FeCl_3 與 FeCl_2 溶液製作檢量線，進行樣品中 Fe^{3+} 與 Fe^{2+} 定量檢測。
2. 使用軟體 Colors v2.3 螢幕取色器，擷取標準溶液照片中的 RGB 值繪製檢量線。(其中紅色的硫氰化鐵用 R 值定量，藍色的普魯士藍用 B 值定量)
3. 再選取樣品溶液照片中的 RGB 值，利用內插法計算樣品中 Fe^{3+} 與 Fe^{2+} 的濃度。

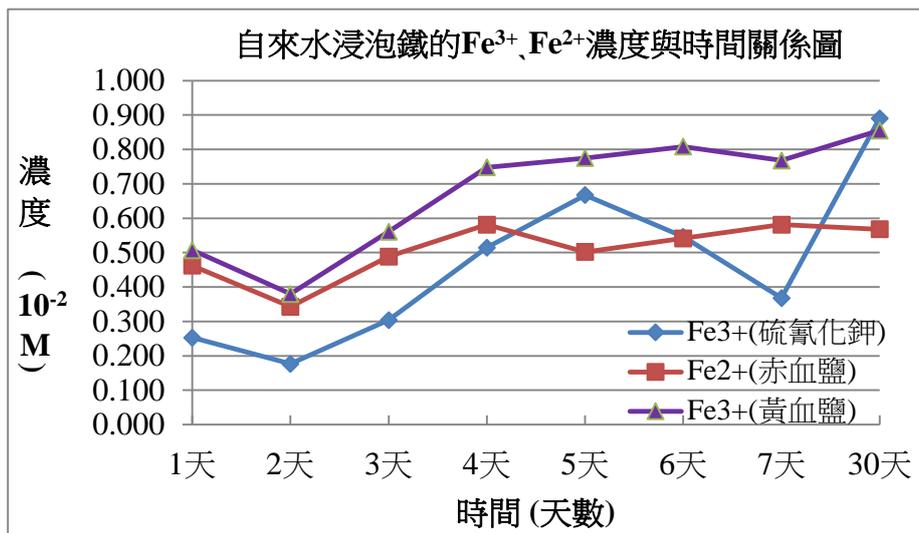


Colors v2.3 螢幕取色器



★ 表四 以自來水浸泡鐵每天的溶液顏色變化

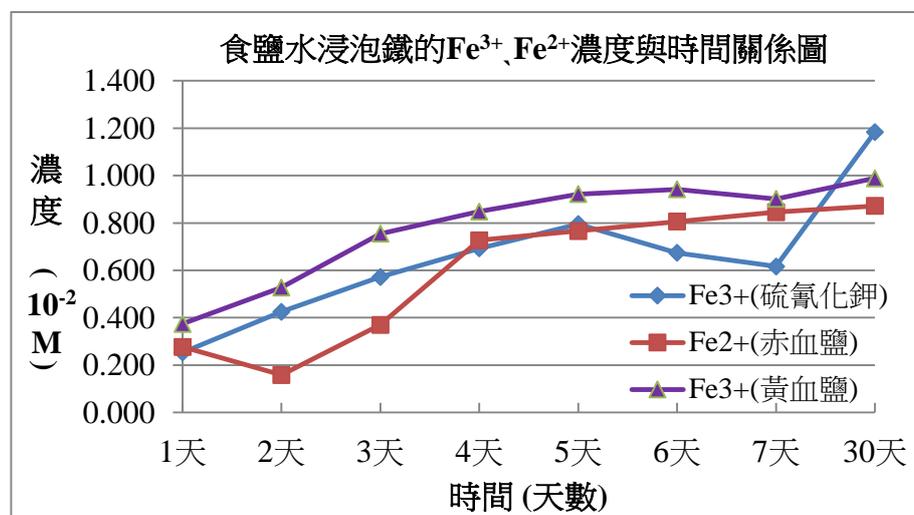
天數 藥品	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀 (赤血鹽)								
亞鐵氰化鉀 (黃血鹽)								



鐵在水中生鏽變化非常明顯，時間愈長生成紅色 $[Fe(NCS)(H_2O)_5]^{2+}$ 與藍色普魯士藍 $K_4[FeIII(FeII(CN)_6)]$ 愈多，顯示溶液中亞鐵離子 Fe^{2+} 與鐵離子 Fe^{3+} 濃度愈高。

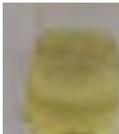
★ 表五 以3%食鹽水浸泡鐵每天的溶液顏色變化

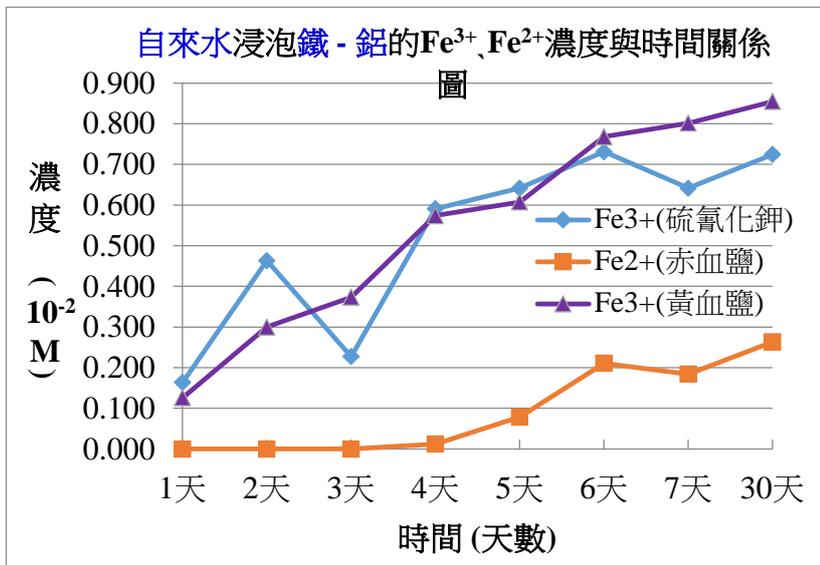
天數 藥品	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀 (赤血鹽)								
亞鐵氰化 鉀(黃血鹽)								



鐵在鹽水中生鏽比在水中明顯，因電解質濃度高，使金屬氧化速度變快，時間愈長生成紅色硫氰化鐵與藍色普魯士藍顏色更深，顯示溶液中亞鐵離子 Fe^{2+} 與鐵離子 Fe^{3+} 濃度更高。

★表六 以自來水浸泡鐵—鋁兩金屬相接每天的溶液顏色變化

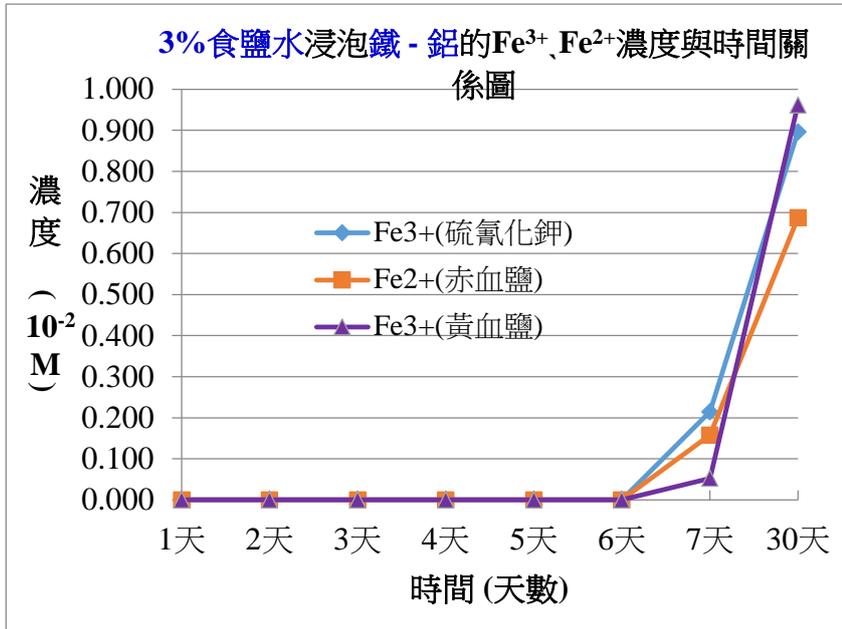
天數 藥品	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀 (赤血鹽)								
亞鐵氰化 鉀(黃血鹽)								



鋁無法在自來水中作犧牲陽極，鐵有生鏽情形，時間愈長生成紅色 $[\text{Fe}(\text{NCS})(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$ 與藍色普魯士藍愈多，顯示鐵離子 Fe^{3+} 濃度愈高，而溶液中幾乎沒有產生亞鐵離子 Fe^{2+} ，可知鐵-鋁相接利於亞鐵離子氧化生成鐵離子。

★表七 以3%食鹽水浸泡鐵—鋁兩金屬相接每天的溶液顏色變化

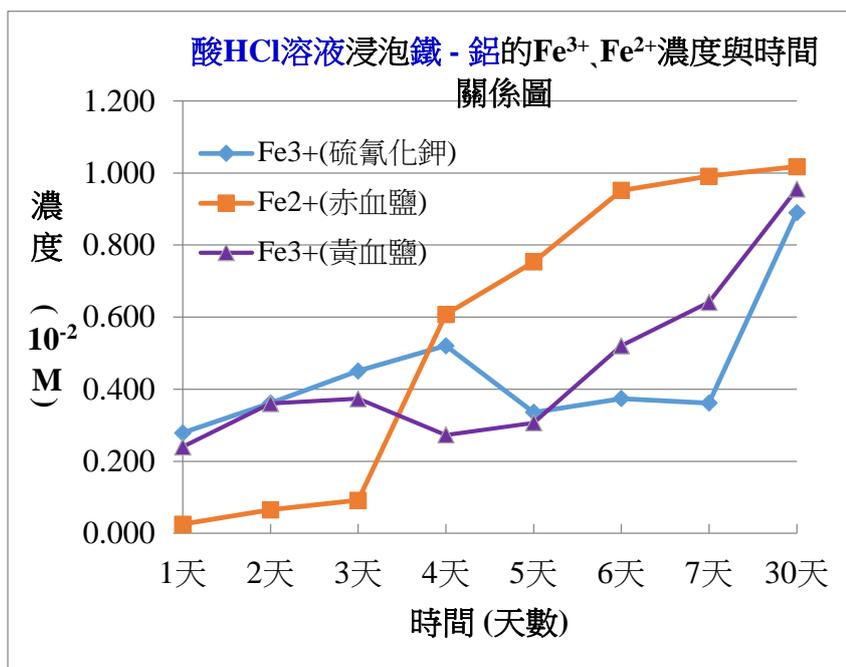
天數 藥品	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀 (赤血鹽)								



我們發現在 3%食鹽水中鋁可以使鐵不會生鏽，從第 1 天到第 6 天溶液檢驗沒有生成紅色 $[Fe(NCS)(H_2O)_5]^{2+}$ 與藍色普魯士藍 $K[Fe^{III}Fe^{II}(CN)_6]$ ，溶液中沒有亞鐵離子 Fe^{2+} 和鐵離子 Fe^{3+} 。但第 7 天之後有生鏽情形發生，與表六自來水相比有明顯較好防鏽效果。

★表八 以酸 HCl 溶液浸泡鐵—鋁每天的溶液顏色變化

天數 藥品	1 天	2 天	3 天	4 天	5 天	6 天	7 天	30 天
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀 (赤血鹽)								
亞鐵氰化鉀 (黃血鹽)								



鐵在酸性 HCl 溶液中會反應產生亞鐵離子 Fe²⁺與鐵離子 Fe³⁺，溶液檢驗生成紅色 [Fe(NCS)(H₂O)₅]²⁺與藍色普魯士藍 K[Fe^{III}Fe^{II}(CN)₆]。但由鐵金屬外觀發現並非生成紅褐色鐵鏽，而是鐵本身與酸反應：

$$\text{Fe} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{FeCl}_2 + \text{H}_2$$

$$2\text{Fe} + 6\text{HCl} \rightarrow 2\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2$$

★表九 以鹼 NaOH 溶液浸泡鐵—鋁每天的溶液顏色變化

天數 藥品	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀 (赤血鹽)								
亞鐵氰化 鉀(黃血鹽)								

在鹼性 NaOH 溶液中鋁可以使鐵不會生鏽，從第 1 天到第 30 天溶液檢驗沒有生成紅色 [Fe(NCS)(H₂O)₅]²⁺與藍色普魯士藍 K[Fe^{III}Fe^{II}(CN)₆]，顯示溶液中沒有亞鐵離子 Fe²⁺和鐵離子 Fe³⁺，鋁在鹼中對鐵有良好陰極防鏽效果，證明電解質濃度高的環境，利於鋁作為犧牲陽極產生氧化反應。

★表十 以自來水浸泡鐵—鋅每天的溶液顏色變化

天數 藥品	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀 (赤血鹽)								
亞鐵氰化 鉀(黃血鹽)								

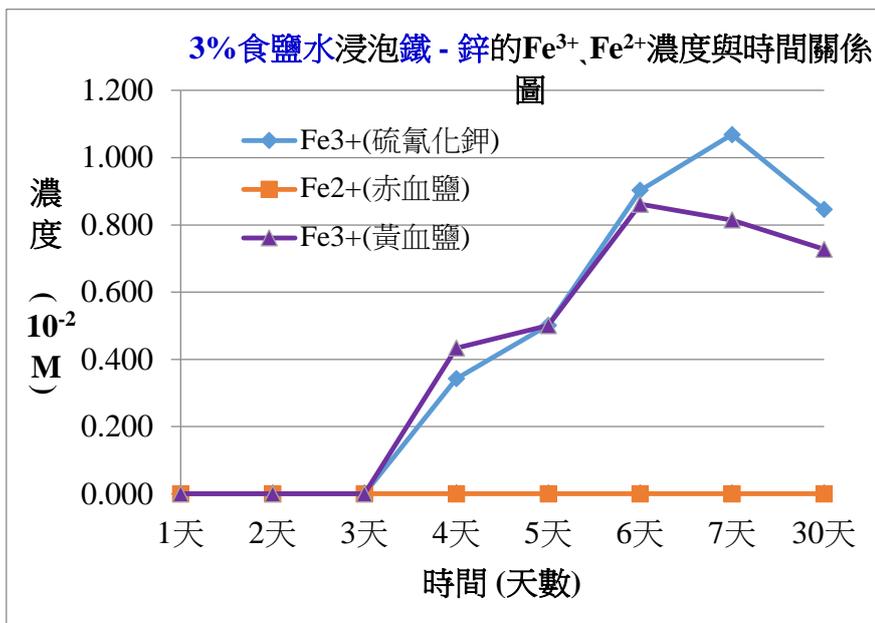
在自來水中鋅可以使鐵不會生鏽，從第1天到第30天溶液檢驗沒有生成紅色

$[\text{Fe}(\text{NCS})(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$ 與藍色普魯士藍 $\text{K}[\text{Fe}^{\text{III}}\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]$ ，溶液中沒有亞鐵離子 Fe^{2+} 和鐵離子

Fe^{3+} ，鋅在自來水中對鐵有良好陰極防鏽效果，證明電解質濃度低的環境，利於鋅作為犧牲陽極產生氧化反應。

★表十一 以3%食鹽水浸泡鐵—鋅每天的溶液顏色變化

天數 藥品	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀 (赤血鹽)								
亞鐵氰化 鉀(黃血鹽)								



鋅無法在 3%食鹽水中作犧牲陽極，鐵有生鏽情形，時間愈長(第 4 天)生成紅色硫氰化鐵與藍色普魯士藍愈多，顯示溶液中鐵離子 Fe³⁺濃度愈高，但赤血鹽檢驗顏色不變，表示溶液中沒有生成亞鐵離子 Fe²⁺，可知鐵-鋅相接利於亞鐵離子氧化生成鐵離子。

★表十二 以自來水浸泡通直流電 3.0 V 的鐵—鋁相接每天的溶液顏色變化

天數 藥品	1 天	2 天	3 天	4 天	5 天	6 天	7 天
硫氰化鉀							
鐵氰化鉀(赤血鹽)							
亞鐵氰化鉀(黃血鹽)							

在自來水中以外加電流法其鋁可對鐵陰極防鏽，直接利用直流電負極對鐵通入電子，使金屬周圍發生還原反應，而本身不氧化，第 1~5 天溶液檢驗沒有生成藍色普魯士藍 $K[Fe^{III}Fe^{II}(CN)_6]$ ，溶液中沒有亞鐵離子和鐵離子。

利用檢量線分析，第 6 天鐵離子濃度約為 $2.66 \times 10^{-3} M$ ，亞鐵離子濃度為 $0 M$ ，較沒有防鏽處理的鐵離子濃度 ($8.08 \times 10^{-3} M$) 低，但些微生鏽表示外加電流法仍有限制與時效。

★表十三 以自來水浸泡通直流電 3.0 V 的鐵—鋅相接每天的溶液顏色變化

天數 藥品	1 天	2 天	3 天	4 天	5 天	6 天	7 天
硫氰化鉀							
鐵氰化鉀 (赤血鹽)							
亞鐵氰化鉀 (黃血鹽)							

在自來水中以外加電流法其鋅可對鐵陰極防鏽，直接利用直流電負極對鐵通入電子，使金屬周圍發生還原反應，而本身不氧化，第 1~5 天溶液檢驗沒有生成紅色 $[\text{Fe}(\text{NCS})(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$ 與藍色普魯士藍 $\text{K}[\text{Fe}^{\text{III}}\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]$ ，溶液中沒有亞鐵離子和鐵離子。

利用檢量線分析，第 6 天鐵離子濃度約為 $1.60 \times 10^{-3} \text{ M}$ ，亞鐵離子濃度為 0 M ，較沒有防鏽處理的濃度 ($8.08 \times 10^{-3} \text{ M}$) 低，但些微生鏽表示外加電流法仍有限制與時效。

捌、研究結論

綜合以上多種實驗測量分析，我們所獲得具體結論如下：

一、 自來水、3%食鹽水及土壤三種環境中，利用鋁、鋅兩種金屬與鐵相接防鏽結果如下：

(一) 在自來水中陰極防鏽效果：鐵—鋅 > 鐵—鋁 > 鐵

(二) 在 3%食鹽水中陰極防鏽效果：鐵—鋁 > 鐵—鋅 > 鐵

(三) 在土壤中陰極防鏽效果：鐵—鋁 > 鐵—鋅 > 鐵

由此可知，船隻在淡水中航行用鋅片防鏽效果較好，在海上航行用鋁片效果較好。

二、 在自來水及 3%食鹽水兩種環境中，利用鋁、鋅兩種金屬相接通直流電 3.0 V 防鏽：

(一) 在自來水中外加電流陰極防鏽效果：鐵—鋅 > 鐵—鋁 > 鐵

(二) 在 3%食鹽水中外加電流陰極防鏽，由於通電會使鋅、鋁金屬氧化解離過快，所以不適合外加電流防鏽。

(三) 在土壤中外加電流陰極防鏽效果：鐵—鋅 > 鐵—鋁 > 鐵

由此可知，地下管線用鋅片防鏽效果較好，但外加電流法中鋅與鋁兩者防鏽效果相近，電解質濃度高的環境不適合外加電流陰極防鏽，否則陽極金屬會快速腐蝕。

玖、文獻統整與比較

一、 停止金屬氧化最常見及有效的方法

(一) 絕緣：油漆、塗料、包覆

(二) 特殊材料：不鏽鋼材，鍍鋅、鍍鋁母材

二、 陰極防蝕工法選擇

	電源	施工	維護	成本
犧牲陽極法	不需要	裝置簡單容易	維護成本較少	較低
外加電流法	需要	施工複雜	需要定期維護	初期成本較高

陰極防蝕原理簡單，防蝕效果安定，且施工簡易，維修費用低，故頗具經濟效益。

三、 防蝕鋅板與防蝕鋁板優缺點比較

項目	優點	缺點
防蝕鋅板	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電流效率可達 98%。 2. 腐蝕面均勻。 3. 在油艙內安裝安全性較高，鋅板墜落時不會產生火花而發生意外。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 有效電氣量僅有 780A · hr/kg。 2. 驅動電壓 (防蝕電流) 較鋁陽極少兩成以上。 3. 國際行情波動，鋅陽極的成本較高。 4. 不建議在 55 度 C 上的環境使用。
防蝕鋁板	<ol style="list-style-type: none"> 1. 有效電氣量為 2600A · hr/kg，可保護電流為鋅板的 1.25 倍; 年限多 25%。 2. 驅動電壓為 0.32V，即同樣尺寸之防蝕鋁板效果多 25%。 3. 在 70 度 C 下的環境使用皆宜。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電流效率約為 93–95 %，較鋅低。 2. 墜落時會發生火花，不適用於油艙。

拾、參考資料

一、淺談—犧牲陽極

<http://synco1234.pixnet.net/blog/post/11621353-%E6%B0%B4%E7%B7%9A%E4%B8%8B%E7%9A%84%E7%A7%98%E5%AF%86-----%E6%B7%BA%E8%AB%87---%E7%8A%A7%E7%89%B2%E9%99%BD%E6%A5%B5sacrificial-an>

二、淺談陰極防蝕

<https://www.masters.tw/84011/cathodicprotection>

三、陰極保蝕

<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=40956>

四、關於防蝕—陰極防蝕—

<https://www.tsectwn.com.tw/protection/2.htm>

五、船底陰極防蝕原理?船底鋅板原理?

<https://www.mobile01.com/topicdetail.php?f=37&t=4332333>

六、金屬氧化 v.s. 電化學腐蝕

<http://www.cycptw.com/jin-shu-yang-hua-v-s-dian-hua-xue-fu-shi>

七、陰極防蝕

<http://www.cycptw.com/cp2>

八、防蝕鋅板與防蝕鋁板優劣點比較

<http://www.cycptw.com/compare>

【評語】 030211

本研究詳細地記錄了抗腐蝕的一些研究，實驗確實就幾種金屬的防鏽使用方式做了完整的探討。不過外加電流的方式似乎不需再加陰極防鏽金屬，否則似會使其電解解離。鐵三價離子在鹼性溶液中會沉澱。實驗雖然很詳細，但缺乏了點新意和驚喜，原始實驗記錄相對簡陋。不過。做實驗的嚴謹態度值得鼓勵，尤其是第二部分量測 Fe(III)與 Fe(II)的生成，其數據可以充分證實所研究的防鏽機制，希望能繼續在研究上扎根。以下幾點建議提供參考：

1. 圖 6 至圖 18，建議 Y 軸可以改成質量的變化量比較容易觀察。
2. 整體的變化量不高，是否有其它量測方式？
3. 用於定量 Fe(II)與 Fe(III)的校正曲線的線性相關係數值偏低，需再嚴謹收取數據。

壹、研究動機

因為加裝鋅或鋁合金，所以船在海裡不會生鏽，**鋅的活性比鐵大，會優先氧化失去電子來保護鐵不被氧化。**2014年高雄發生的嚴重氣爆事故，事後調查為丙烷管線遭不當包覆於排水箱涵內，**管線周圍被挖空無法外加電流防鏽**，使管壁生鏽腐蝕，不能負荷輸送管內壓力而破損，導致運送中液態丙烷外洩，這讓我們對**陰極防鏽**更加好奇。為了解防鏽原理，請老師講解國二下學期理化的**金屬活性與氧化還原**，我們也設計相關實驗去探討不同防鏽方法，更深入研究生活中**陰極防鏽**的應用。

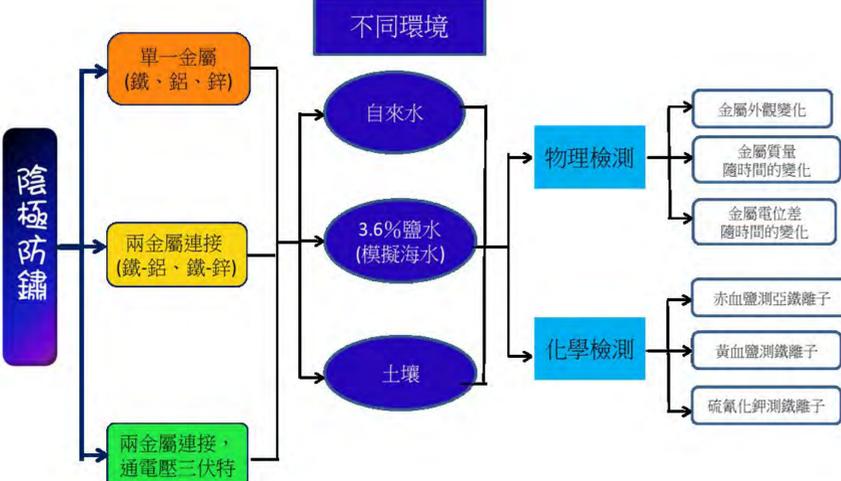
貳、研究目的

- 一、在自來水、鹽水與土壤進行實驗，模擬生活中不同環境對金屬氧化的影響。
- 二、利用**鋁和鋅**作為**犧牲陽極**，研究其防鏽效果。
- 三、主要以兩種方法進行陽極金屬(**鋁、鋅**)對鐵的陰極防蝕研究
 - (一)**犧牲陽極法**：使用兩金屬連接(**鐵-鋁、鐵-鋅**)，模擬船隻於海上的防鏽方法。
 - (二)**外加電流法**：兩金屬連接(**鐵-鋁、鐵-鋅**)通直流電**3.0V**及**1.5V**，模擬地下管線通直流電的陰極防蝕。
- 四、利用三種實驗方法，探討金屬氧化情形：
 - (一)稱量**鐵、鋁與鋅**隨時間的質量變化。
 - (二)測量鐵-鋅及鐵-鋁兩金屬相接的**電位差**，了解**金屬氧化造成電壓隨時間的變化**。
 - (三)用**硫氰化鉀、亞鐵氰化鉀與鐵氰化鉀**檢測鐵、鐵-鋁、鐵-鋅浸泡溶液中的**鐵離子**與**亞鐵離子**濃度變化，並進行定量分析。

參、研究設備與藥品

研究器材: 食鹽水、水、土壤、三用電表、整流器
研究藥品: 亞鐵氰化鉀、鐵氰化鉀、硫氰化鉀、氫氧化鈉、鹽酸、氯化鐵、氯化亞鐵

肆、研究大綱



伍、研究原理

	一天	二天	三天	四天	五天	六天	七天
鐵-鹽水							
鐵-水							

一、鐵生鏽的原理

鐵的生鏽速度會受水影響，因為**電解質**存在而加速。生鏽主要反應是氧的還原： $O_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow 4OH^-$ 。由於反應產生**氫氧根離子**，所以**酸會加速此反應的進行**。同時將**鐵氧化為亞鐵離子**： $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ 。若有氧的存在，**亞鐵離子會再度氧化**： $4Fe^{2+} + O_2 \rightarrow 4Fe^{3+} + 2O^{2-}$ 。**亞鐵離子和鐵離子和水產生酸鹼反應**，形成 $Fe(OH)_2$ 及 $Fe(OH)_3$ ： $Fe^{2+} + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2H^+$ ； $Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$ 。最後**氫氧化鐵及氫氧化亞鐵會和其脫水物形成以下的平衡**： $Fe(OH)_2 \rightarrow FeO + H_2O$ ； $Fe(OH)_3 \rightarrow FeO(OH) + H_2O$ ； $2FeO(OH) \rightarrow Fe_2O_3 + H_2O$ 。可看出**鐵生鏽會受到氧和水的影響**。若**溶氧量有限**，容易產生含**亞鐵離子**的產物。若**溶氧量高**，則會產生**鐵離子**的產物，由於鐵鏽仍在緩慢進行化學反應，成份會隨時間變化。

二、陰極防鏽方法

(一) 水中設施與船舶的防鏽

船貼上**活性比鐵大的鋅金屬**，能使鋼鐵成為陰極反應區，降低鐵的溶出速率。這種方法稱為「**犧牲陽極的陰極保護法**」。

(二) 地下管線的防鏽

地下管路大多是採用「**外加電流法**」，以**直流電源**透過數個**活性比鐵大的電極**將電子供給受保護的鐵金屬，使其成為電池中陰極而能防蝕。

陸、實驗設計

➤ 選用鋅片及鋁片作為犧牲陽極的原因：

- 一、選擇**活性比鐵大的金屬**，且反應性不過高較安定(去除鹼金屬與鹼土金屬)。
- 二、**解離的金屬陽離子毒性較低**(去除鉻、錳等)，減少環境污染。
- 三、**方便容易取得**，且成本較低能廣泛應用。
- 四、**參考文獻**一般使用**鋅鋁合金**，所以研究鋅片及鋁片各自作為犧牲陽極的防鏽效果。

➤ 實驗裝置設計：

一、兩金屬直接連接(鐵-鋁)在三種環境的裝置與反應

自來水
陽極： $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$
陰極： $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

食鹽水
陽極： $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$
陰極： $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

土壤
陽極： $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$
陰極： $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

二、兩金屬直接連接(鐵-鋁)在酸與鹼溶液中的裝置與反應

HCl溶液
陽極： $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$
($2Al + 6HCl \rightarrow 2AlCl_3 + 3H_2 \uparrow$)
陰極： $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
($2Fe + 6HCl \rightarrow 2FeCl_2 + 3H_2 \uparrow$)

NaOH溶液
陽極： $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$
($2Al + 2NaOH + 2H_2O \rightarrow 2NaAlO_2 + 3H_2 \uparrow$)
陰極： $2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2$

三、兩金屬直接連接(鐵-鋅)在三種環境的裝置與反應

自來水
陽極： $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$
陰極： $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

食鹽水
陽極： $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$
陰極： $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

土壤
陽極： $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$
陰極： $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

四、兩金屬連接通直流電3.0V(鐵-鋁)在三種環境的反應

自來水
陽極： $H_2O \rightarrow 2H^+ + 1/2O_2 + 2e^-$
 $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$
陰極： $2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2$

食鹽水
陽極： $H_2O \rightarrow 2H^+ + 1/2O_2 + 2e^-$
 $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$
陰極： $2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2$

土壤
陽極： $H_2O \rightarrow 2H^+ + 1/2O_2 + 2e^-$
 $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$
陰極： $2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2$

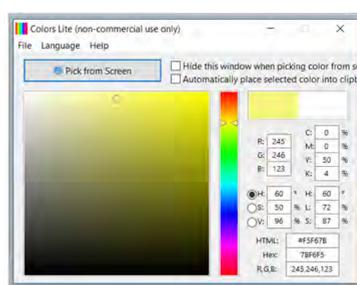
五、兩金屬連接通直流電3.0V(鐵-鋅)在三種環境的反應

自來水
陽極： $H_2O \rightarrow 2H^+ + 1/2O_2 + 2e^-$
 $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$
陰極： $2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2$

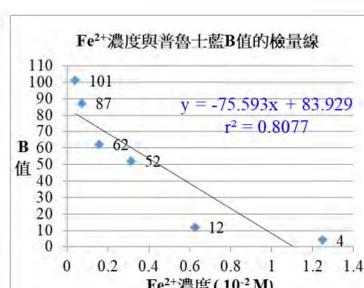
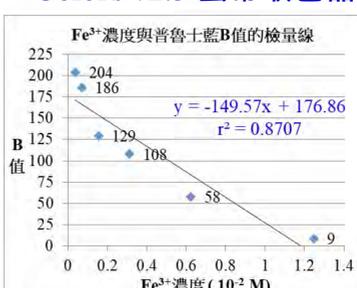
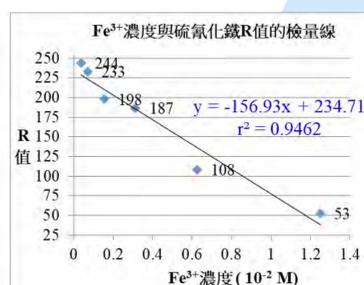
食鹽水
陽極： $H_2O \rightarrow 2H^+ + 1/2O_2 + 2e^-$
 $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$
陰極： $2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2$

土壤
陽極： $H_2O \rightarrow 2H^+ + 1/2O_2 + 2e^-$
 $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$
陰極： $2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2$

★ 定量分析 – 檢驗反應生成的鐵離子 Fe^{3+} 與亞鐵離子 Fe^{2+}



Colors v2.3 螢幕取色器



柒、研究過程與方法

一、物理方法—觀察金屬外觀與溶液的變化

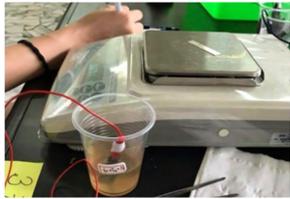
(一) 三種條件浸泡鋅、鋁、鐵，觀察其氧化的外觀變化

1. 將鐵、鋅、鋁個別放入三種環境。
 2. 用鱷魚夾將鐵-鋁、鐵-鋅接好放入三種環境中。
- ▲ 因為鋁可在鹽水中保護鐵不生鏽，故設計鐵-鋁放在酸和鹼溶液的實驗。
3. 用鱷魚夾將鐵-鋁、鐵-鋅接好通直流電 3.0V，分別放入三種環境。
- ▲ 通直流電 3.0 V，會使鋁片和鋅片快速腐蝕溶出，改為每 30 分鐘觀察。
4. 拍照記錄上述步驟 1~3 中金屬 1~7 天、30 天的金屬生鏽與溶液狀態。



(二) 三種條件浸泡鋅、鋁、鐵的質量隨時間變化

1. 將上述步驟三種條件的各金屬片夾出溶液。
2. 以電子天平稱量並記錄其 1~7 天、30 天的金屬質量變化。



(三) 三種環境浸泡的兩金屬電位差隨時間變化

1. 將上述步驟兩金屬相接在三種環境中的各金屬片夾出。
2. 用三用電表測量其 1~7 天、30 天的鐵-鋁、鐵-鋅電位差變化。



捌、研究結果分析

一、物理方法—以三種條件浸泡金屬片的外觀變化

(一) 各金屬(鋅、鋁、鐵)在三種環境中的氧化情形

1. 鋁片和鋅片在環境中表面會生成氧化層(氧化鋁和氧化鋅)，保護內部，溶液顏色為透明無色。
2. 鐵片在電解質濃度高的鹽水中最容易生鏽，其次是在自來水中，土壤中生鏽時間較長，顯示電解質利於氧化還原反應。

(二) 鐵-鋁相接、鐵-鋅相接在三種環境中的氧化情形

1. 由實驗結果發現在自來水中防鏽效果較好的是鐵和鋅兩金屬相接，第 7 天才有鐵鏽。
2. 3% 食鹽水中陰極防鏽效果較好的是鐵和鋁兩金屬相接，到第 7 天仍沒有鐵鏽產生。
3. 鋁在電解質濃度高的酸與鹼溶液中，也可減緩鐵生鏽，酸到第 5 天才有鐵鏽產生；鹼中則沒有鐵鏽，有白色氫氧化鋁沉澱。

(二) 兩金屬相接(鐵-鋁、鐵-鋅)在三種環境中的氧化情形 表四、兩金屬外觀變化

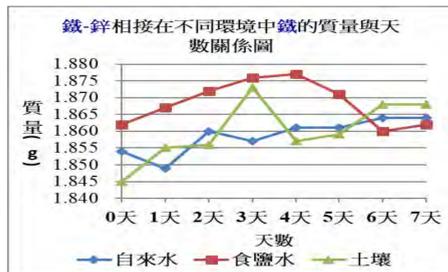
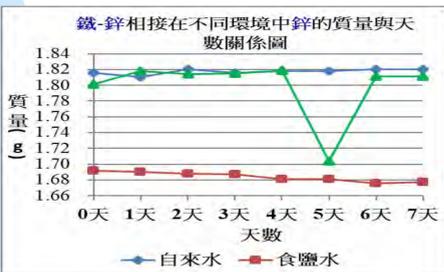


二、三種條件浸泡金屬(鋅、鋁、鐵)質量隨時間的變化

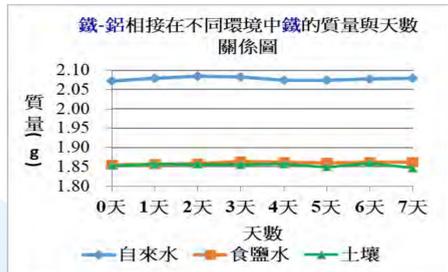
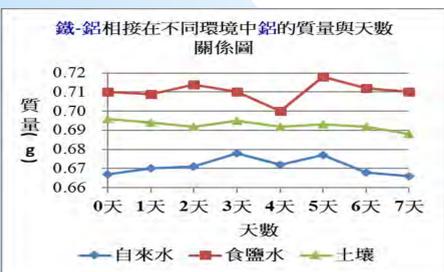
(一) 各金屬在三種環境中的質量變化

1. 鋅片、鋁片質量幾乎不變，因為鋅、鋁在環境中表面生成緻密氧化層(氧化鋅、氧化鋁)，保護內部不會鏽蝕。
2. 鐵在環境中會因為產生氧化鐵而質量稍增，但是因為 3~5 天鐵鏽脫落掉入溶液，所以質量減少。

(二) 兩金屬相接在三種環境中的質量變化



1. 鋅在溶液中質量有減少趨勢，因為鋅會進行氧化反應 $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ ，解離出鋅離子而使鋅片質量減少，作犧牲陽極使陰極的鐵減緩生鏽。
2. 鐵到後來幾天質量增加，代表仍有生鏽只是較慢。

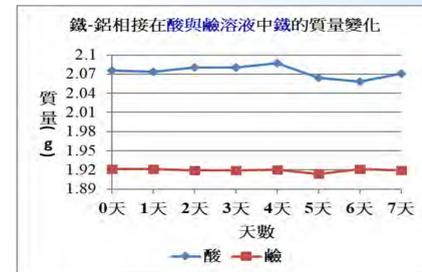
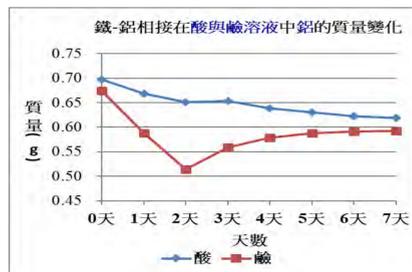


1. 鋁在溶液中進行氧化反應 $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ 解離出鋁離子，減緩鐵生鏽。
2. 鋁的質量幾乎不變，可能是部分解離至溶液中，部分生成氧化物沉積於鋁片表面。

二、化學方法—利用化學試劑檢驗金屬反應生成亞鐵離子與鐵離子

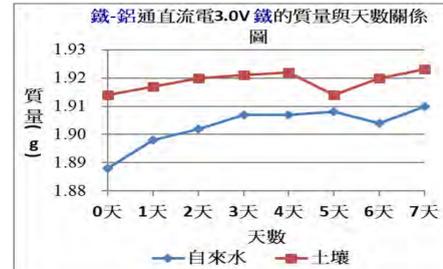
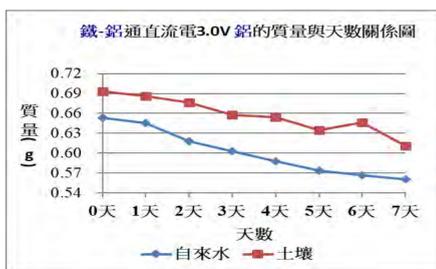
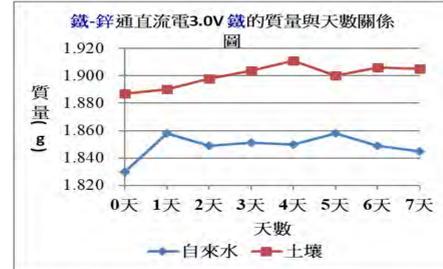
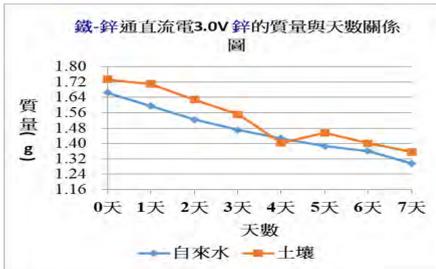
(一) 利用硫氰化鉀、黃血鹽、赤血鹽檢驗樣品中的鐵離子與亞鐵離子

1. 配製硫氰化鉀、亞鐵氰化鉀(黃血鹽)、鐵氰化鉀(赤血鹽)溶液。
2. 取浸泡金屬片的自來水與食鹽水溶液，吸取 2 mL 溶液加入樣品瓶。
3. 吸取 1 mL 的稀釋鹽酸加入樣品瓶，使酸與鐵鏽反應產生鐵離子與亞鐵離子。
4. 加入赤血鹽、黃血鹽及硫氰化鉀溶液各 1 mL，檢驗反應顏色變化。
5. 重複上述步驟 1~4，拍照紀錄 1~7 天及 30 天的溶液顏色變化。
6. 配標準濃度的 $FeCl_3$ 與 $FeCl_2$ 溶液製作檢量線，進行樣品中 Fe^{3+} 與 Fe^{2+} 的定量檢測。

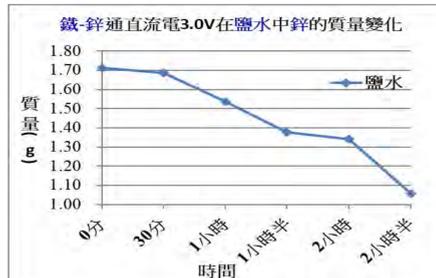


1. 鋁在 3% 食鹽水中對鐵有防鏽效果，所以我們增加酸 HCl 與鹼 NaOH 溶液來實驗，可以發現鋁在電解質濃度高的酸與鹼溶液中，可保護鐵不被氧化。
2. 鐵片上接受電子產生還原反應，故質量幾乎不變。

(三) 兩金屬相通直流電 3.0 V 在三種環境中的質量變化

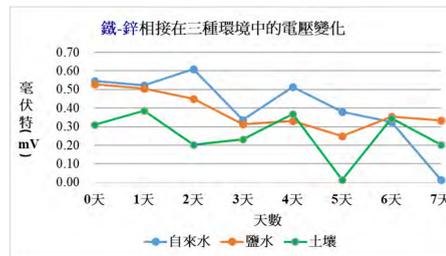


1. 鋅、鋁和鐵相通直流電，鋅、鋁接到電源正極，加速氧化反應解離出鋅離子與鋁離子 $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ ； $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ ，使鋅片及鋁片上有溶蝕與斷裂，質量減少明顯。
2. 鐵的質量變化不大，鐵接到電源負極，接受電子產生還原反應，而減緩鐵的生鏽。

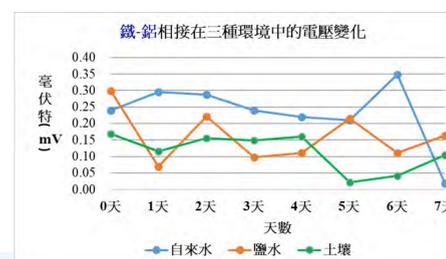


1. 鐵-鋅、鐵-鋁相接在食鹽水中通直流電，會使金屬片快速溶出，故改以每 30 分鐘測一次質量，由於氧化反應太劇烈，還是有部分斷裂，鋅、鋁片質量明顯下降。
2. 鐵接到電源負極，接受電子產生還原反應，而減緩鐵的生鏽。

三、兩金屬相接電位差隨時間的變化



1. 鐵-鋅電壓不穩定有下降趨勢，因溶液與土壤中有其他副反應，所以測到電壓非標準電極電位差。
2. 鐵-鋅在自來水中電壓下降最多，且陰極防鏽效果較好，推測是鋅片氧化程度較高影響電極反應。



1. 鐵-鋁電壓不穩定有下降趨勢，因溶液與土壤中有其他副反應，所以測到電壓非標準電極電位差。
2. 鐵-鋁在在電解質鹽水中電壓下降最多，且陰極防鏽效果較好，推測是鋁片氧化程度較高影響電極反應。

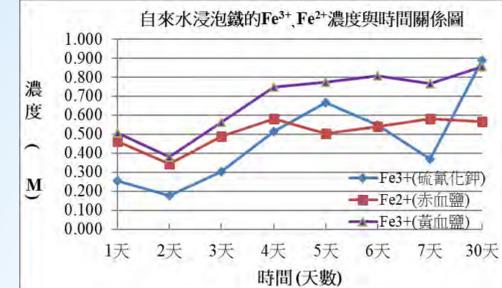
二、化學方法-檢驗金屬反應生成亞鐵離子與鐵離子

本實驗用以檢驗的是硫氰化鉀和亞鐵氰化鉀(黃血鹽)、鐵氰化鉀(赤血鹽)。

硫氰根離子與鐵離子 Fe^{3+} ，會反應生成紅色的硫氰化鐵
亞鐵氰化鉀與鐵離子 Fe^{3+} 反應產生藍色亞鐵氰化鐵，
鐵氰化鉀遇到亞鐵離子 Fe^{2+} 會產生藍色亞鐵氰化鐵。

★ 自來水浸泡鐵每天的溶液顏色變化

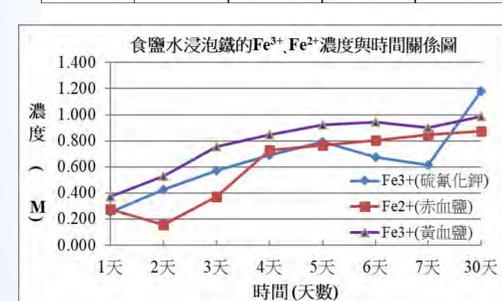
天數	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
化學藥劑								
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀(赤血鹽)								
亞鐵氰化鉀(黃血鹽)								



鐵在自來水中生鏽變化明顯，時間愈長生成紅色硫氰化鐵與藍色普魯士藍愈多，濃度曲線有上升趨勢，顯示溶液中亞鐵離子 Fe^{2+} 與鐵離子 Fe^{3+} 濃度愈高。

★ 3%食鹽水浸泡鐵每天的溶液顏色變化

天數	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
化學藥劑								
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀(赤血鹽)								
亞鐵氰化鉀(黃血鹽)								



鐵在鹽水中生鏽比在水中明顯，因電解質濃度高，使金屬氧化變快，時間愈長生成紅色硫氰化鐵與藍色普魯士藍顏色更深，濃度曲線有上升趨勢，顯示溶液中亞鐵離子 Fe^{2+} 與鐵離子 Fe^{3+} 濃度更高。

★ 自來水浸泡鐵-鋁兩金屬相接每天的溶液顏色變化

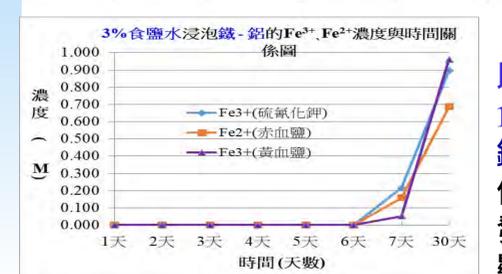
天數	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
化學藥劑								
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀(赤血鹽)								
亞鐵氰化鉀(黃血鹽)								



鋁無法在自來水中作犧牲陽極，鐵有生鏽情形，時間愈長生成紅色硫氰化鐵與藍色普魯士藍愈多， Fe^{3+} 濃度曲線有上升趨勢，顯示鐵離子 Fe^{3+} 濃度愈高，而溶液中幾乎沒有產生亞鐵離子 Fe^{2+} ，可知鐵-鋁相接利於 Fe^{2+} 氧化生成 Fe^{3+} 。

★ 以 3%食鹽水浸泡鐵-鋁兩金屬相接的溶液顏色變化

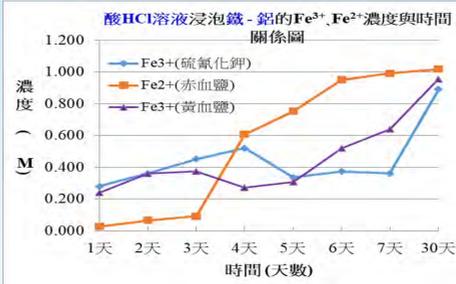
天數	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
化學藥劑								
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀(赤血鹽)								
亞鐵氰化鉀(黃血鹽)								



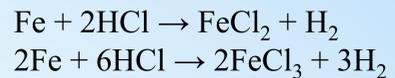
在3%食鹽水中鋁可以使鐵不會生鏽，從第1~6天檢驗溶液中沒有亞鐵離子 Fe^{2+} 和鐵離子 Fe^{3+} 。但第7天之後有生鏽情形發生，與自來水相比有明顯較好防鏽效果。

★ 以酸 HCl 溶液浸泡鐵-鋁每天的溶液顏色變化

天數	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
化學藥劑								
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀(赤血鹽)								
亞鐵氰化鉀(黃血鹽)								



鐵在酸性HCl溶液中會反應產生亞鐵離子 Fe^{2+} 與鐵離子 Fe^{3+} 濃度曲線有上升趨勢，並非生成紅褐色鐵鏽，而是鐵本身與酸反應：



★ 以鹼 NaOH 溶液浸泡鐵-鋁每天的溶液顏色變化

天數	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
化學藥劑								
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀(赤血鹽)								
亞鐵氰化鉀(黃血鹽)								

在鹼性 NaOH 溶液中沒有 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} ，鋁在鹼中對鐵有良好陰極防鏽效果，證明電解質濃度高的環境，利於鋁作為犧牲陽極產生氧化反應。

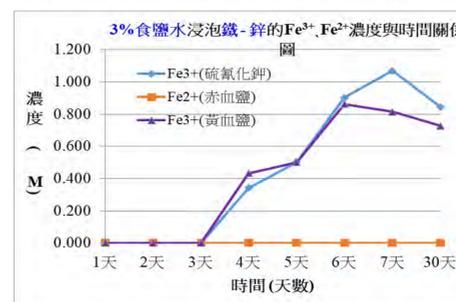
★ 以自來水浸泡鐵-鋅每天的溶液顏色變化

天數	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
化學藥劑								
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀(赤血鹽)								
亞鐵氰化鉀(黃血鹽)								

第1~30天檢驗溶液中沒有 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} ，鋅在自來水中對鐵有良好陰極防鏽效果，證明電解質濃度低的環境，利於鋅作為犧牲陽極產生氧化反應。

★ 以 3%食鹽水浸泡鐵-鋅每天的溶液顏色變化

天數	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	30天
化學藥劑								
硫氰化鉀								
鐵氰化鉀(赤血鹽)								
亞鐵氰化鉀(黃血鹽)								



鋅無法在3%食鹽水中作犧牲陽極，鐵有生鏽情形，時間愈長(第4天)生成紅色硫氰化鐵與藍色普魯士藍愈多， Fe^{3+} 濃度曲線有上升趨勢，但赤血鹽檢驗顏色不變，表示沒有 Fe^{2+} ，可知鐵-鋅相接利於 Fe^{2+} 氧化生成 Fe^{3+} 。

★ 以自來水浸泡通直流電 3.0 V 的鐵-鋁相接溶液顏色變化

天數	1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天
化學藥劑							
硫氰化鉀							
鐵氰化鉀(赤血鹽)							
亞鐵氰化鉀(黃血鹽)							

- 在自來水中以外加電流法其鋁可對鐵陰極防鏽，第1~5天溶液檢驗沒有生成藍色普魯士藍，溶液中沒有 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 。
- 利用檢量線分析，第6天 Fe^{3+} 濃度約為 $2.66 \times 10^{-3} M$ ， Fe^{2+} 濃度為 $0 M$ ，較沒有防鏽處理的 Fe^{3+} 濃度($8.08 \times 10^{-3} M$)低，但些微生鏽，表示外加電流法仍有限制與時效。

玖、研究結論

綜合以上多種實驗分析，所獲得具體結論如下：
一、自來水、3%食鹽水及土壤三種環境中，利用鋁、鋅兩種金屬與鐵相接防鏽結果：
(一) 在自來水中陰極防鏽效果：鐵—鋅 > 鐵—鋁 > 鐵
(二) 在3%食鹽水中陰極防鏽效果：鐵—鋁 > 鐵—鋅 > 鐵
(三) 在土壤中陰極防鏽效果：鐵—鋁 > 鐵—鋅 > 鐵
由此可知，船隻在淡水中航行用鋅片防鏽效果較好，在海上航行用鋁片水及3%食鹽水兩種環境中，利用鋁、鋅兩種金屬相接通直流電效果較好。

二、在自來水及3%食鹽水兩種環境中，利用鋁、鋅兩種金屬相接通直流電 3.0 V 防鏽：

- 自來水中外加電流防鏽效果：鐵—鋅 > 鐵—鋁 > 鐵
- 3%食鹽水中外加電流陰極防鏽，由於通電會使鋅、鋁金屬氧化解離過快，所以不適合外加電流防鏽。
- 土壤中外加電流防鏽效果：鐵—鋅 > 鐵—鋁 > 鐵
由此可知，地下管線用鋅片防鏽效果較好，但外加電流法中鋅與鋁兩者防鏽效果相近，電解質濃度高的環境不適合外加電流陰極防鏽，否則陽極金屬會快速腐蝕。