

添加鉬、銅對鐵錳鋁鉻合金鋼腐蝕行爲之影響

李志偉

Effects of Mo and Cu addition on the corrosion behavior of Fe-Mn-Al-Cr alloys

Jyh-Wei Lee

摘要

本研究選用四種鐵錳鋁鉻合金鋼，藉著 3.5wt%NaCl 水溶液的電化學測試與硝酸、醋酸、磷酸及氫氧化鈉等四種沸騰酸（鹼）液的浸泡實驗來評估添加不同含量鉬元素與銅元素的 Fe-26Mn-7Al-5.5Cr-1C 合金鋼之腐蝕行爲。傳統 Fe-29Mn-9Al-0.75C 之鐵錳鋁合金鋼、商用 304 不銹鋼及 410 不銹鋼亦被選取測試以作比較。

由測試結果發現，不含鉬鉻的鐵錳鋁合金鋼抗蝕性最差，添加 1% 鉬則使鐵錳鋁鉻合金具有最佳的耐蝕性。而添加 1.6% 鉬會促使鐵錳鋁鉻合金鋼析出碳化鉬而降低抗蝕性，不過在該合金鋼添加 1% 銅並無法使其耐蝕性變好。整體而言，Fe-26Mn-7Al-5.5Cr-1C-1Mo 合金與傳統 410 不銹鋼的耐腐蝕性相當，而且在 20% 醋酸沸騰溶液的 48 小時浸泡實驗中，該合金鋼之抗蝕性則優於 410 不銹鋼，並逼近 304 不銹鋼。

關鍵詞：鐵錳鋁鉻合金鋼、電化學測試、浸泡實驗、孔蝕。

ABSTRACT

The corrosion properties of four Fe-26Mn-7Al-5.5Cr-1C based alloy steels have been studied. The electrochemical tests in 3.5wt%NaCl aqueous solution and immersion tests in boiling nitric acid, acetic acid, phosphorous acid and sodium hydroxide solutions were employed to evaluate the effects of Mo and Cu addition on the corrosion behavior of these alloy steels. The Fe-29Mn-9Al-0.75C alloy, commercial 304 and 410 stainless steels were also chosen for comparison.

The results showed that the Fe-Mn-Al alloy without any Cr, Mo or Cu addition had very poor corrosion resistance, whereas the alloy addition with 1% Mo and 5.5%Cr exhibited excellent performance. The corrosion resistance of Fe-Mn-Al-Cr alloy addition with 1.6% Mo was inferior due to the precipitation of carbides. The addition of 1% Cu cannot enhance the corrosion resistance. In general, the corrosion resistance of Fe-26Mn-7Al-5.5Cr-1C-1Mo alloy is similar to that of 410 SS. Especially the corrosion resistance of this alloy is even better than 410 SS, and comparable to 304 SS in the boiling 20% acetic acid solution immersion test for 48 hours.

Key words: Fe-Mn-Al-Cr alloy, electrochemical test, immersion test, pitting.

* 東南工業專科學校機械工程科
Department of Mechanical Engineering, Tung Nan Junior College

一、前言

鐵錳鋁合金鋼的發明最早可追溯至 1887 年英國的 Robert Hadfield 所發表的專利⁽¹⁾，而後在韓戰期間因鎳短缺而使業界將注意力放在發展低鎳或不含鎳的錳鉻不銹鋼，而鐵錳鋁合金鋼亦受到相當多人的重視，當時此類合金主要的研究重點是在抗高溫氧化及硫化的應用上，也有些學者專家嘗試將此合金鋼用來取代部份的傳統鎳鉻不銹鋼，希望以錳取代鎳，以鋁取代鉻，利用較廉價的合金元素獲得類似傳統不銹鋼的性質⁽²⁾，因此有人稱此鐵錳鋁不銹鋼為窮人的不銹鋼⁽³⁾。國內對於鐵錳鋁合金鋼的研究已逾 20 年，期間亦有學者曾經嘗試將此鋼種量產化，希望能夠取代部分的商用不銹鋼，然而並未成功。以往對鐵錳鋁合金鋼抗蝕性的評估⁽⁴⁻¹³⁾發現，傳統的鐵錳鋁合金鋼的耐蝕性能仍然比商用不銹鋼差了許多，然而這些研究都是以 Fe-Mn-Al-C 合金為基礎，甚少對含鉻鉬的鐵錳鋁合金系統做分析探討，因此本研究選用四種含鉻的鐵錳鋁合金鋼，並且分別添加不同含量的鉬與銅元素。藉著 3.5wt%NaCl 水溶液的電化學測試與四種沸騰溶液的浸泡實驗來評估添加不同含量鉬元素與銅元素對鐵錳鋁合金鋼耐蝕性能的影響。

二、實驗步驟

1. 試片備製

本實驗所採用的四種鐵錳鋁鉻合金鋼（編號合金 A 至 D）及不含鉻的鐵錳鋁合金鋼（編號合金 E）素材分別以 30Kg 高週波溶解爐於空氣中冶煉，其化學成分列於表 1。各鋼錠經 1100°C，4 小時均質化後熱鍛成扁鋼胚，接著 1100°C，1 小時退火，再將表面銹皮刨除，冷軋至 2.2mm 厚，最後以水冷式砂輪切割機切成 20×50×2.2mm 與 12×12×2.2mm 之適當尺寸。冷軋後的鋼片進行

表 1 各式合金鋼成分分析(wt%)

Table 1 Chemical compositions (wt%) of the tested alloys

	Mn	Al	C	Cr	Mo	Cu	Fe
合金 A	26.4	6.4	0.998	5.6	0	0	餘量
合金 B	26.3	6.8	0.884	5.5	1.03	0	餘量
合金 C	28.5	7.4	1.04	5.8	1.62	0	餘量
合金 D	25.5	6.9	0.99	5.5	1.16	1.0	餘量
合金 E	29.1	9.0	0.75	0	0	0	餘量
SUS410	1.0	--	0.15	11.5-	--	--	餘量
	max		max	-13.5			
SUS304	2.0	--	0.08	18-	--	--	餘量
*	max		max	-20			

*SUS304 另含 8-10.5wt% Ni

1100°C，20 分鐘之退火處理，退火時以氬氣保護以避免氧化或氮化。市售之商用 304 及 410 不銹鋼片亦被選取測試以作比較，其成分如表 1 所示。上述切割妥當的各式鐵錳鋁合金鋼及 304、410 不銹鋼試片，均以 SiC 砂紙加水逐步研磨至 #1200，再浸入酒精以超音波清洗震盪後烘乾備用。

2. 電化學實驗

本實驗採用 12×12×2.2mm 之方形試片，置於適當之試片座，使其暴露面積為 1cm²。電化學實驗所使用機型為 EG&G Model 273A 恆電位儀，動電位極化實驗選用溶液為 25°C 之 3.5%NaCl 水溶液。掃描速率為 1mV/s，以飽和甘汞電極(SCE)為參考電極，高密度碳棒為輔助電極。

3. 浸泡實驗

本實驗採用尺寸為 20×50×2.2mm 之試片，分別計算表面積與秤重（精度至 0.0001g）。浸泡實驗依照 ASTM A262-86 Practice C(CNS 4764)之方法，將各試片（合金 E 除外）分別浸泡於沸騰之 65%HNO₃ 中 48 小時，浸泡後試片以清水沖洗並用軟毛刷去除表面腐蝕生成物，烘乾後秤重，以計算其腐蝕速率。

除上述熱硝酸浸泡實驗之外，各試片（合金 E 除外）另分別浸泡於沸騰的 50% NaOH、

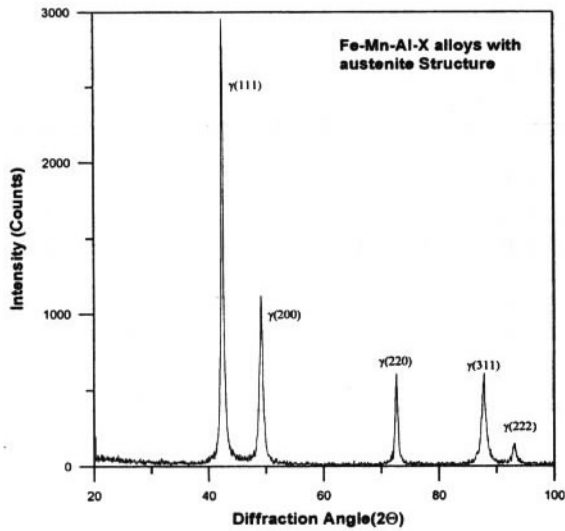


圖 1 合金 A 至 E 之 X 光繞射圖。
Fig. 1 Typical X-Ray diffraction pattern of the Fe-Mn-Al-X alloys.

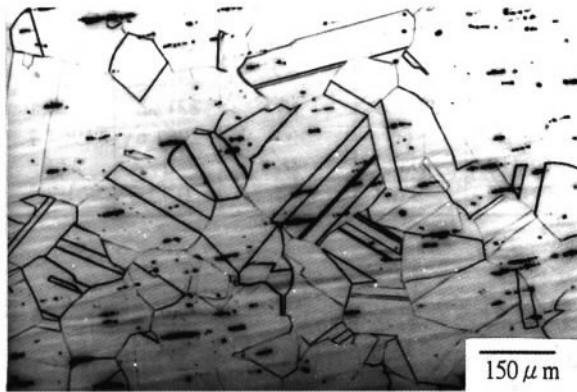


圖 2 合金 A 退火後顯微組織金相。
Fig. 2 Optical micrograph of annealed alloy A.

20%CH₃COOH與20%H₃PO₄等熱酸(鹼)48小時，並依照上述方法計算各種合金的腐蝕速率。

4. 試片分析

鐵錳鋁合金鋼試片 A 至 E 經冷軋退火後以金相顯微鏡觀察其顯微結構，並以 X 光繞射儀分析其結晶構造。動電位極化後的各試片以及於沸騰 20% CH₃COOH 浸泡 48 小時的試片（取出後直接

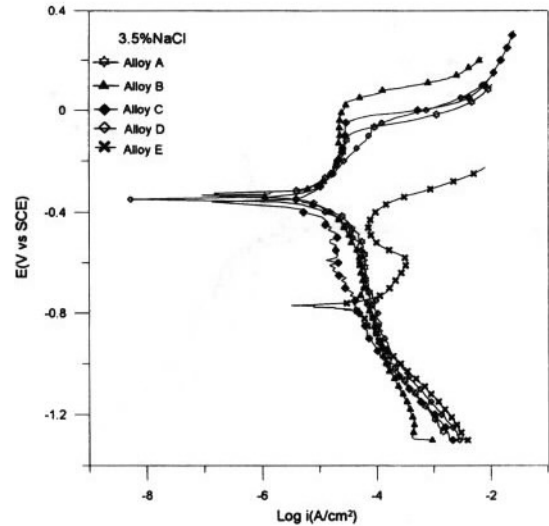


圖 3 五種鐵錳鋁合金鋼於 3.5% NaCl 水溶液之極化曲線圖(25°C)。
Fig. 3 Polarization curves of five Fe-Mn-Al alloys in 3.5% NaCl solution at 25°C.

烘乾，不消除表面腐蝕生成物）均以 Philip SEM 515 掃描式電子顯微鏡(SEM)及 X-光能量光譜微量分析儀(EDS)分析腐蝕表面型態及腐蝕生成物。

三、結果

1. 合金組織

由於本合金系統添加非常高量的錳、碳元素，所以五式鐵錳鋁合金鋼在冷軋退火之後，以 X 光繞射儀分析均為沃斯田鐵結構，其繞射圖如圖 1 所示。圖 2 為合金 A 之顯微組織，其他各式合金亦有極類似之組織。

2. 電化學實驗結果

五式鐵錳鋁合金鋼試片於 25°C 之 3.5%NaCl 水溶液的極化曲線如圖 3 所示，較佳之合金 B、C、410 不銹鋼與 304 不銹鋼之極化曲線繪於圖 4，各合金之動電位極化曲線特性值列於表 2。由電化學實驗數據可以明顯發現，不含鉻的鐵錳鋁合金鋼

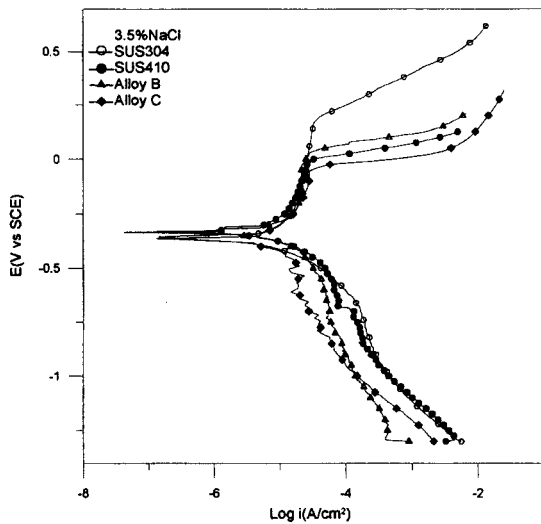


圖 4 鐵錳鋁合金鋼 B、C 與 410、304 不銹鋼於 3.5% NaCl 水溶液(25°C)之極化曲線圖。
Fig. 4 Polarization curves of Fe-Mn-Al alloys B, C, SUS410 and SUS304 in 3.5% NaCl solution at 25°C.

(合金 E) 在 3.5%NaCl 水溶液的抗蝕性最差，鈍化區非常窄，其腐蝕電位比其他合金低了一倍，孔蝕電位也低了一個數量級，此結果與先前的研究相符⁽⁹⁾。然而添加 5.5wt% 鉻 (合金 A) 就大幅改善鐵錳鋁合金的抗蝕性，其原因應該歸功於鉻形成的氧化鉻保護膜與較低含量的錳元素⁽⁹⁾。添加 5.5wt% 鉻與 1.03wt% 鉬的合金 B 是這五式鐵錳鋁合金鋼試片中抗蝕性最好的材料，其孔蝕電位與鈍化區寬度都優於 410 不銹鋼。合金 B 與 304 不銹鋼比較，二者的腐蝕電位與鈍化電流密度相當，但是後者的孔蝕電位高了一個數量級，鈍化區也有 1.5 倍之多，雖然在 3.5%NaCl 水溶液的環境中，鐵錳鋁鉻鉬合金鋼的鈍態膜仍較 304 不銹鋼者略遜一籌，但是與先前學者所作之研究比較，該成分已屬極具抗蝕性之鐵錳鋁合金。

3. 浸泡實驗結果

四式鐵錳鋁鉻合金鋼 (合金 E 除外) 與 410、304 不銹鋼在四種熱酸 (鹼) 性水溶液浸泡 48 小

表 2 各式試片於 25°C，3.5% NaCl 水溶液之動電位極化曲線特性值 *

Table 2 Electrochemical parameters of tested alloys in 3.5% NaCl solution at 25°C

特性值 合金編號	E _{corr} (mVSCE)	E _{pp} (mVSCE)	I _p (A/cm ²) ×10 ⁻⁵	鈍化區 (mV)
合金 A	-332.1	-97	3.07	215
合金 B	-334.1	+27	2.49	341
合金 C	-362.7	-51	3.37	292
合金 D	-350.7	-71	---	258
合金 E	-769.1	-408	8.57	187
SUS410	-333.5	-9	2.82	305
SUS304	-367.4	+167	3.88	514

*E_{corr}：腐蝕電位 E_{pp}：孔蝕電位
I_p：鈍化電流密度

表 3 各式試樣於各式沸騰酸 (鹼) 性水溶液浸泡小時之腐蝕速率 (mpy)

Table 3 Corrosion rates (mpy) of alloys tested in each boiling acids (basic) for 48hours

	50% NaOH	20% CH ₃ COOH	20% H ₃ PO ₄	65% HNO ₃
合金 A	1132.8	57.6	3177.6	4610.4
合金 B	981.6	15.6	2323.2	1623.6
合金 C	1072.8	18	2212.8	4220.4
合金 D	966	46.8	2931.6	1964.4
SUS410	195.6	96	6	22.8
SUS304	9.6	2.4	0.72	1.2

時的腐蝕速率如表 3 所示，在各種數據中，304 不銹鋼仍然具有最佳的抗蝕性，此與其 18wt%Cr 與 8wt%Ni 的合金含量有關，410 不銹鋼的抗蝕性則次佳。總體而言，含有 5.5wt% 鉻與 1.03wt% 鉬的合金 B 在鐵錳鋁合金鋼之中具有最好的抗蝕性，而只添加 5.6wt% 鉻的合金 A 之抗蝕性最差。含有 5.8wt% 鉻、1.62wt% 鉬的合金 C 與添加 5.5wt% 鉻、1.16wt% 鉬、1.0wt% 銅的合金 D 的抗蝕性則介乎中間，合金 C 在沸騰醋酸與磷酸的抗蝕性優於合金 D，不過合金 D 在沸騰氫氧化鈉與硝酸的抗蝕性則優於合金 C。此結果與 3.5%NaCl 水溶液之極化曲線實驗結果大致符合。值得注意的是在沸騰 20% 醋酸浸泡 48 小時的數據，四式鐵錳鋁鉻合金鋼都比 410 不銹鋼的抗蝕性優異。

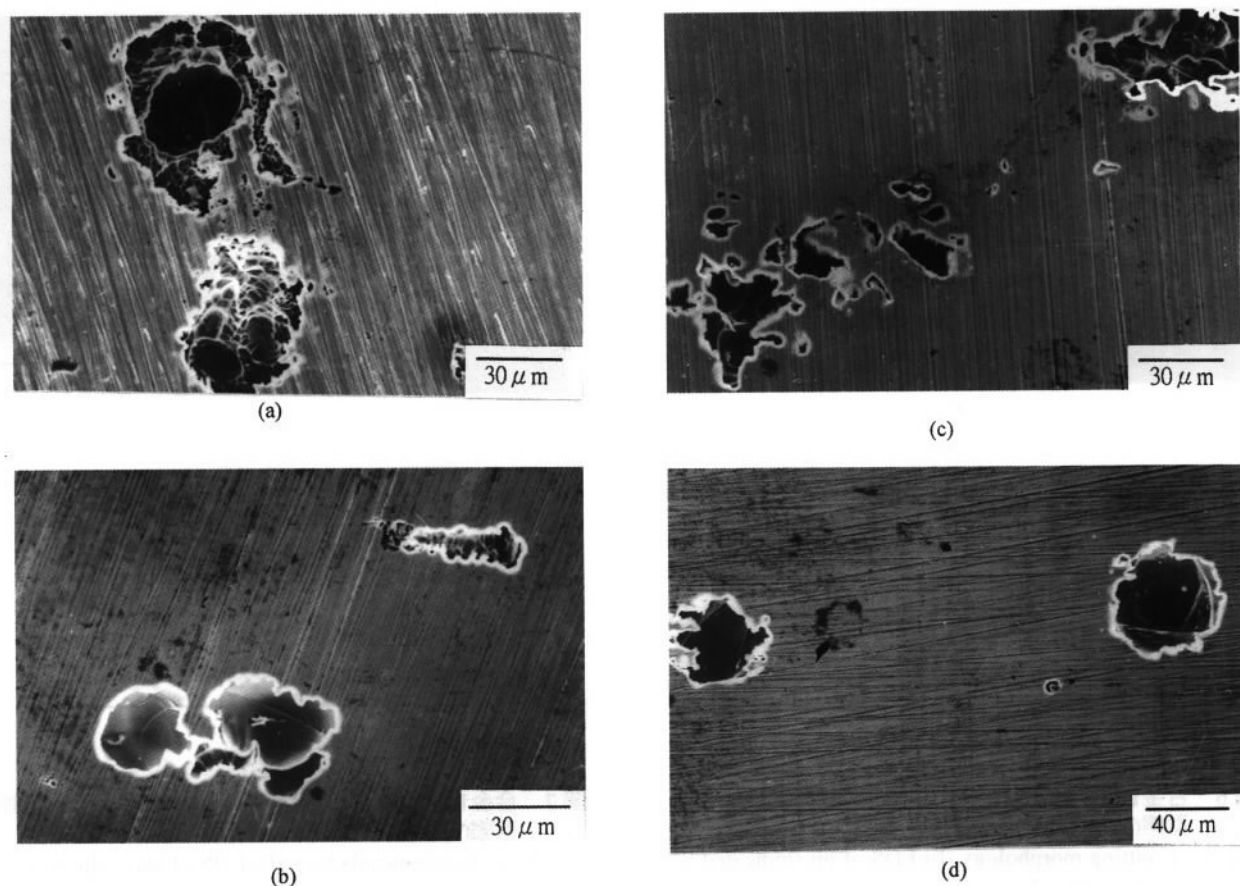


圖 5 25°C，3.5wt% NaCl 水溶液中極化曲線測試後表面 SEM 金相(a)合金(b)合金(c)合金(d)合金 D。
Fig. 5 SEM micrographs of alloy(a)A (b)B (c)C and (d)D after polarization tests in 3.5wt% NaCl solution at 25°C.

4. 顯微組織之觀察與分析

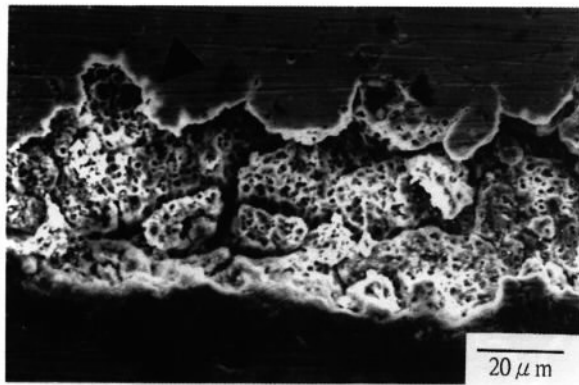
合金 A 至 D 經極化曲線測試後的表面型態 SEM 金相如圖 5 所示，均呈現孔蝕的腐蝕形態，其中合金 C 的蝕孔較小，與其他三種合金者明顯不同。各合金的蝕孔均呈現較深、凹陷的形狀，而非 Tsai 等人⁽⁹⁾觀察之圓形淺孔。

由極化曲線測試的合金 D 表面蝕孔的 SEM/EDS 分析結果顯示，蝕孔內部的錳、硫與鉛含量極高（詳見圖 6），由此證明在鐵錳鋁鎳合金鋼系統中，由於極高的錳含量很容易形成 MnS 析出物，成為孔蝕的起始點而造成材料的抗蝕性下降，此現象在 Lin 的研究結果⁽¹²⁾也有相同的發現。由抗蝕性最好的合金 B 蝕孔型態觀察發現（如圖 7），幾

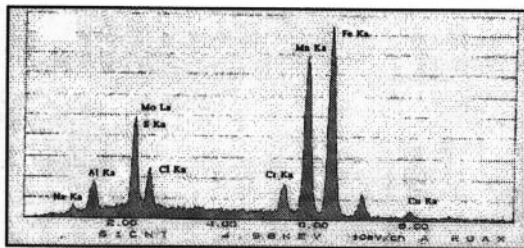
乎所有的孔蝕都是起自 Al_2O_3 的夾渣，將合金 B 以 10% HNO_3 及 1% HF 酒精溶液浸蝕 30 分鐘，其金相組織及鋁元素 mapping 如圖 8 所示，可以明顯發現 Al_2O_3 的夾渣物。Moskowitz 對於鋼鐵材料抗蝕性的研究也有同樣的結論⁽¹⁹⁾。因此如果能在熔煉過程有效去除介在物、雜質或不純物，鐵錳鋁鎳合金鋼的抗腐蝕性應該還可以向上提昇。

合金 A 至 D 於沸騰 20% CH_3COOH 浸泡 48 小時的試片表面之 SEM 金相如圖 9 所示。合金 A 具有嚴重孔蝕與均勻腐蝕的型態，合金 B、C、D 皆以孔蝕為主，而合金 B、D 晶界腐蝕的現象也很明顯。

四、討論



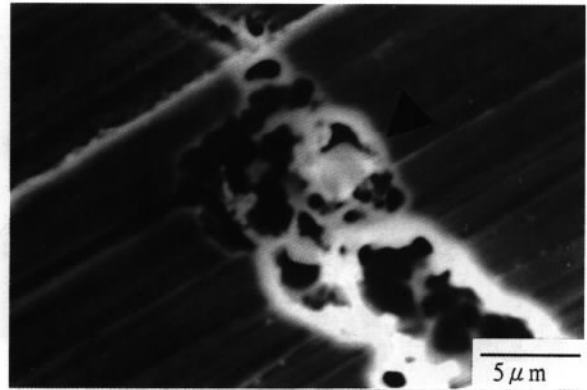
(a)



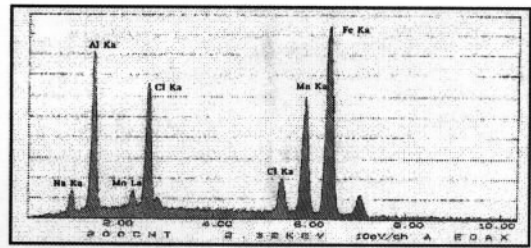
(b)

圖 6 合金 D 於 3.5% NaCl 水溶液極化曲線測試後 (a) 孔蝕型態 (b) 蝕孔 (如箭頭所示) 圖。

Fig. 6 (a) pitting morphology (b) EDS of pit (indicated by arrow) of alloy D after polarization test in 3.5% NaCl solution.



(a)



(b)

圖 7 合金 B 於 3.5% NaCl 水溶液極化曲線測試後 (a) 孔蝕型態 (b) 蝕孔 (如箭頭所示) 圖。

Fig. 7 (a) pitting morphology (b) EDS of pit (indicated by arrow) of alloy D after polarization test in 3.5% NaCl solution.

1. 添加鉬的效果

傳統 Fe-Ni-Cr 系統不銹鋼添加鉬與鉻能有效的使鈍態膜在氯離子環境中保持穩定，尤其鉬對於抵抗孔蝕及間隙腐蝕特別有效，這在以往的文獻已做過極多的探討⁽¹⁵⁻¹⁹⁾。具有沃斯田鐵相的 Fe-28Mn-7Al-5.5Cr-1C 合金鋼再添加 1.03wt% 鉬所製成的合金 B 是鐵錳鋁合金鋼系統中對 3.5%NaCl 水溶液抗蝕性最好的合金，其孔蝕電位與鈍化區寬度均較 410 不銹鋼優異，鉬元素對於提昇該合金鋼的抗腐蝕性能有絕對的功效，此與林義勝等人⁽¹³⁾針對鐵錳鋁粉末冶金的研究結論相同。

Lorenz 等人⁽¹⁵⁾提出的抗孔蝕當量(Pitting Resistance Equivalent)PRE 的計算公式如下：

$$PRE = \%Cr + 3.3(\%Mo) + 16(\%N)$$

式中 %Cr、%Mo 與 %N 分別是 Cr、Mo 和 N 三種元素在合金鋼中的重量百分比。合金 A、B、C 與 D 的 PRE 值分別為 5.6、8.899、11.146 與 9.328，然而對照表 2 與表 3 的腐蝕數據發現，四種鐵錳鋁合金鋼的抗蝕性與其抗孔蝕當量不符，原本應該具有最佳抗蝕性的合金 C (含 1.62wt% 鉬) 反而比含 1.03wt% 鉬的合金 B 差。以電子微探儀(EPMA, JEOL JXA 8800M)對極化曲線測試的合金 C 表面蝕孔作鉬、碳元素分布分析發現，蝕孔內部有碳化鉬析出物生成(詳見圖 10 的箭頭所示區域)，因此加入過多的 1.62wt% 鉬元素與鐵錳鋁合金鋼的碳元素化合成碳化鉬，在晶界析出造成晶界腐蝕，使得該合金的抗蝕性下降。

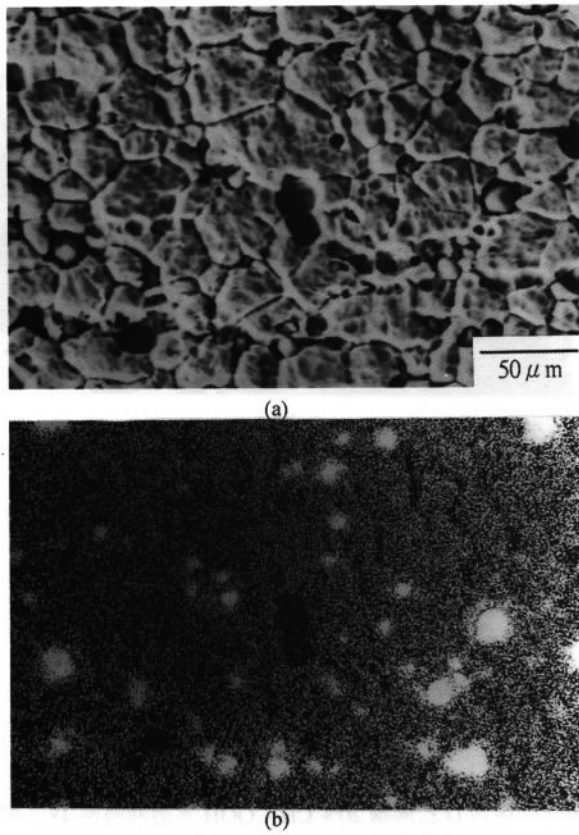


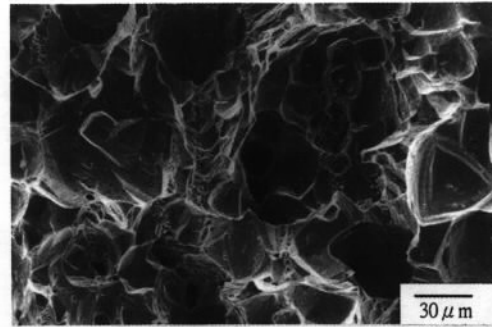
圖 8 合金 B 於 10% HNO₃+1% HF 溶液浸蝕 30 分的 (a) 顯微組織 (b) Al Mapping 圖。

Fig. 8 (a) Microstructure, (b) Al Mapping of alloy B after etching in 10% HNO₃+1% HF solution for 30 minutes.

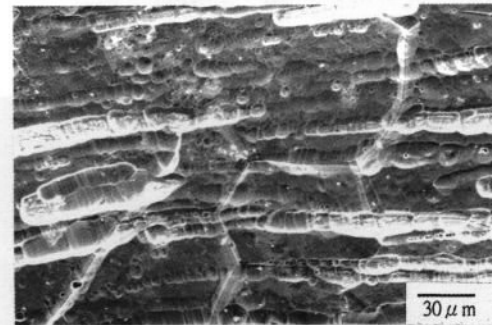
對於高含碳量鐵錳鋁合金鋼而言，添加過多的鉻與鉬卻會產生碳化物析出，反而造成抗孔蝕性的下降。因此抗孔蝕當量公式僅適於傳統 Fe-Ni-Cr 或 Fe-Cr 系不銹鋼，卻無法提供鐵錳鋁合金鋼的抗孔蝕能力評估。

根據本研究結果發現，根據「以錳取代鎳，以鋁取代鉻」的觀念所製成的鐵錳鋁合金鋼，雖然添加了 5.5wt% 鉻與 1wt% 鉬，但是在強酸鹼環境中的抗蝕能力仍不及傳統不銹鋼，無法產生穩定的鈍化膜來降低其腐蝕行為，不過在弱酸，例如醋酸等腐蝕環境中仍然具有相當良好的抗蝕行為。

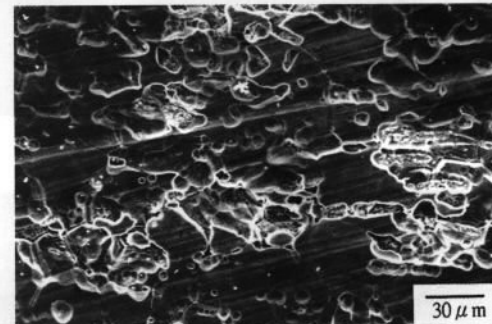
若將本研究所使用的合金配方與相關研究結果



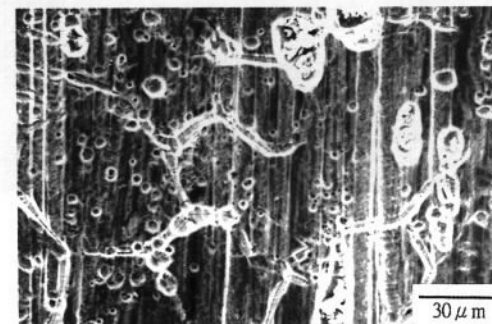
(a)



(b)



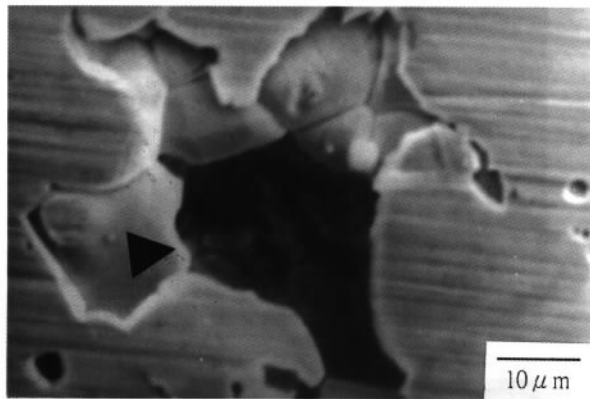
(c)



(d)

圖 9 沸騰 20wt% CH₃COOH 浸泡 48 小時後表面 SEM 金相 (a) 合金 (b) 合金 (c) 合金 (d) 合金。

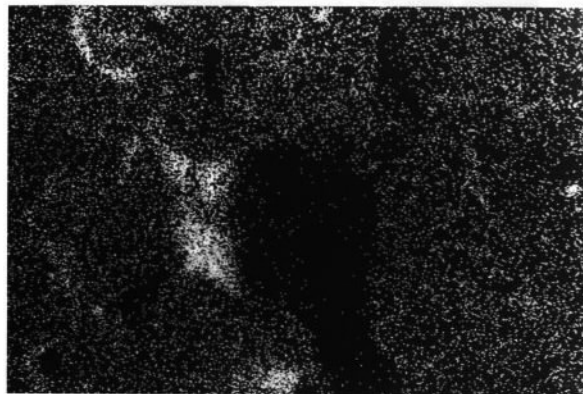
Fig. 9 SEM micrographs of alloy (a) A (b) B (c) C and (d) D after immersion tests in boiling 20wt% CH₃COOH for 48 hours.



(a)



(b)

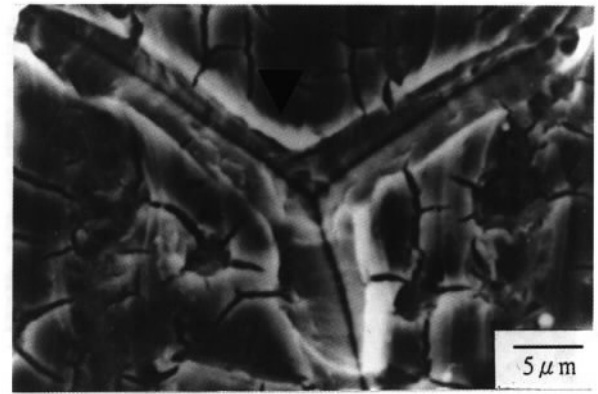


(c)

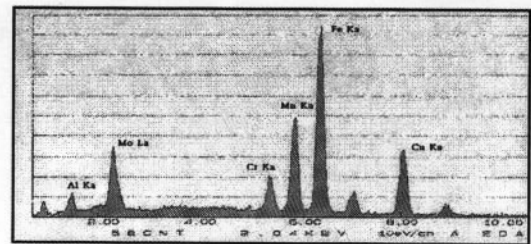
圖 10 金合 C 於 3.5% NaCl 水溶液極化曲線測試 (a) 孔蝕型態 (b) Mo mapping (c) C mapping。

Fig. 10 (a) pitting morphology (b) Mo mapping (c) C mapping of alloy D after polarization test in 3.5% NaCl solution.

比較⁽⁴⁻¹³⁾，合金 B 應該是近年來鐵錳鋁合金鋼系統中最具抗腐蝕能力的材料。因此為維持沃斯田鐵



(a)



(b)

圖 11 金合 D 於沸騰 20% CH₃COOH 水溶液浸泡 48 小時後 (a) 晶界腐蝕 SEM 金相 (b) 晶界之 EDS 圖。

Fig. 11 (a) SEM micrograph of intergranular corrosion (b) EDS of grain boundary of alloy D immersed in boiling 20% CH₃COOH solution for 48 hours.

結構，同時顧及提高抗腐蝕性與避免碳化物的析出，在鐵錳鋁鉻合金鋼添加 1wt% 鉬含量最適當。

2. 添加銅的效果

在高強度低合金鋼系統之中，添加銅元素可有效提高其工業區的大氣腐蝕抗蝕性，此歸因於銅與空氣中的 SO₂ 化合生成硫酸鹽類，在材料表面形成細晶粒、緊密附著的抗銹薄膜⁽²⁰⁾。含銅合金鋼在海邊的大氣腐蝕實驗亦有相同的提昇效果⁽²⁰⁾。

傳統 Fe-Ni-Cr 不銹鋼系統中添加銅可以提高抗均勻腐蝕能力⁽²¹⁾，並且對於硫酸等還原性酸的環境有促進鈍態膜生成，提高腐蝕電位，整體改善其抗腐蝕性的效果^(18,22,23)，然而根據本研究發現，在鐵錳鋁合金鋼添加 1wt% 銅（合金 D）似乎並無

此種效果，反而使該合金的孔蝕電位下降，鈍化區減小，整體抗蝕性下降，與不加鉬的合金 A 相當。

合金 D 於沸騰 20%CH₃COOH 浸泡 48 小時的試片表面呈現明顯而嚴重的腐蝕現象，在三個晶粒相接的晶界以 EDS 分析含有極多的銅與鉬（如圖 11），形成含銅鉬的析出物。由本觀察可知鐵錳鋁鉻合金添加銅元素對抗蝕性似乎並無具體好處。

六、結論

1. 在 Fe-26Mn-7Al-5.5Cr-1C 合金鋼添加 1.03wt% 鉬可有效提高沃斯田鐵相鐵錳鋁鉻合金鋼之耐蝕性能，然而添加至 1.62wt% 鉬卻使該合金鋼析出碳化物而降低抗蝕性。
2. 在 Fe-26Mn-7Al-5.5Cr-1C 合金鋼添加 1wt% 銅無法提高沃斯田鐵相鐵錳鋁鉻合金鋼之耐蝕性，反而使該合金鋼產生嚴重之腐蝕現象。
3. 在 Fe-26Mn-7Al-5.5Cr-1C 合金鋼添加 1 至 1.62% 鉬及添加 1wt% 銅於 20% 醋酸沸騰溶液環境之抗蝕性均優於 410 不銹鋼，其中添加 1.03% 鉬者之抗蝕性逼近 304 不銹鋼。
4. 在 Fe-26Mn-7Al-5.5Cr-1C-1Mo 合金鋼的孔蝕起始位置均起自 Al₂O₃ 的夾渣，若能在熔煉過程有效去除介在物、雜質或不純物，鐵錳鋁鉻合金鋼的抗腐蝕性可以向上提昇。

誌謝

本研究承蒙鎔泓貿易公司林熾燦先生的協助，以及台灣大學材料研究所韋文誠教授提供 SEM/EDS 分析設備，特此致謝。

參考文獻

1. R.A.Hadfield, US Patent 422403 (1887).
2. J.R.Mitchell and M.E.Potter, US Patent 3201230 (1965).
3. J.L.Ham and R.Z.Carins, Pro. Eng. 29 No.52 (1958).
4. S.K.Banerji, Metal Prog. , April (1978) 59.
5. S.k.Banerji, Foote Mineral Company Report, (1982).
6. J.C.Benz and H.W.Leavenworth Jr., J. Metals, 3 (1985) 36.
7. R.Wang and F.H.Beck, Met. Progr.3 (1983) 72.
8. R.Wang and R.A.Rapp, in Proceedings of 9th International Corrosion Conference, Toronto, June 4 (1984) 545.
9. Wen-Ta Tsai, Jing-Bang Duh, and Ju-Tung Lee, J. Mater. Sci. 22 (1987)3517.
10. Wen-Ta Tsai, Jing-Bang Duh, and Ju-Tung Lee, Corrosion Science, Nov. (1988)810.
11. S.C. Tjong, Surface and Coating Tech., 28 (1986) 181.
12. Lin Chin-Tsan, Master Thesis, National Tsing Hua University, 1988.
13. 林義勝，張士欽，林群新，中華民國八十七年材料年會論文集(1997)p. 465。
14. A.Moskowitz, et al., ASTM Spec. Tech Publ. 418 (1966)3.
15. K. Lorenz and G. Medawar, Thyssen Forsch., 1(1969) 97.
16. A.J. Sedriks, International Metals Reviews, 28(1983) 295.
17. W. Yang, R-C.Ni, and H-Z.Hua, Corrosion Science, 24 (1984)691.
18. 劉宏義，潘永村，中華民國八十五年度防蝕學會論文集，(1996)p.101。
19. 涂成一，李汝桐，蔡文達，中華民國八十七年度防蝕學會論文集，(1998)153。
20. M. Schumacher, Ed., Seawater Corrosion Handbook, Noyes Data Corp., (1979) .
21. L.R. Scharfstein, ASTM Spec. Tech. Publ. 418 (1966) 90.
22. D.Itzhak and P. Peled, Corrosion Science, 26 (1986) 49.
23. B.I. Voronenko, Protection of Metals, 30,4(1994)317.