

熱處理對 Ni₂FeCoCrAl 高熵合金的腐蝕磨耗行為研究

甘昉蓉¹ Ismail Rahmadtulloh¹ 駱碧秀^{2,3} 鄭偉鈞⁴ 李志偉^{*1,5,6,7}

^{1*}明志科技大學材料工程系

²長庚大學通識教育中心自然科

³林口長庚紀念醫院核子醫學暨分子影像中心

⁴台灣科技大學機械工程學系

⁵明志科技大學電漿與薄膜科技中心

⁶長庚大學機械工程學系

⁷林口長庚紀念醫院整形外科

Email: jefflee@mail.mcut.edu.tw

科技部計畫編號 MOST-109-2224-E-011-001

摘要

高熵合金自 2004 年被報導後，由於具有特殊之高熵效應，擁有高強度、優異抗腐蝕能力與抗高溫氧化等特性，因此受到學研界與產業界的重視。本研究探討 1050°C 均質化退火熱處理與 700°C，24 小時之時效熱處理分別對 FCC 結構的新型 Ni₂FeCoCrAl 高熵合金於 3.5 % 氯化鈉水溶液的靜態腐蝕與腐蝕磨耗特性的影響，本實驗亦採用鎳基超合金 Inconel 718 和 304 不銹鋼作為對照材料。實驗結果顯示，700°C 時效熱處理可使 Ni₂FeCoCrAl 高熵合金產生 Ni₃Al 析出相而將其硬度從 HRB73.5 提升到 HRB93.3。經過 1050°C 退火處理的高熵合金具有最佳的抗靜態腐蝕性質，其次是 Inconel 718 與，而 304 不銹鋼的耐靜態腐蝕性質最差。由腐蝕磨耗試驗計算結果顯示，硬度最高與抗蝕性佳的 Inconel 718 具有最少的總材料損失率 (0.5503 mm/yr)，因此抵抗 3.5% 氯化鈉水溶液的腐蝕磨耗性能最佳，反之 304 不銹鋼因為抗蝕性最差與硬度較低，因此其抗腐蝕磨耗性能最差。而經過 700°C 時效硬化處理的高熵合金由於具有良好的耐腐蝕性和較高硬度，因此其抗腐蝕磨耗能力略低於 Inconel 718 者，但是優於退火處理高熵合金與 304 不銹鋼。本研究發現，採用 700°C，24 小時之時效熱處理可提升 Ni₂FeCoCrAl 高熵合金之硬度，因此具有與 Inconel 718 相近的抗腐蝕磨耗性能。

關鍵字：均質化退火、時效熱處理、Ni₂FeCoCrAl 高熵合金、鎳基超合金 Inconel 718、腐蝕磨耗

1. 前言

高熵合金 (High entropy alloy, 簡稱 HEA) 其定義為具有至少五個主要元素的合金，並且每種元素的濃度在 5 和 35 at.% 之間⁽¹⁻²⁾，不含任何濃度超過 50 at.% 的元素⁽¹⁻²⁾，通過相近的等莫耳比元素結合而成，形成一種具有高混和熵的新型合金⁽³⁻⁵⁾，只要透過適當的成

分設計，其在硬度、耐磨性、抗氧化性等方面，皆將可能有優異的表現⁽³⁾。

高熵合金的耐蝕性質是除了其機械性質之外值得探究的特性，高熵合金在某些腐蝕環境及條件下具有優良的表現，清華大學材料系施漢章教授曾經發表利用動電位極化曲線量測⁽⁶⁾，來評估高熵合金於含氯離子或硫酸水溶液環境中的孔蝕及均勻腐蝕特性，研究發現當高熵合金含有 Cr、Ni、Mo 等元素時，於含氯離子環境條件下，HEA 比起傳統 304、304L 及 316 不銹鋼有較佳的抗孔蝕性質，以及於酸性硫酸水溶液中有較佳的耐均勻腐蝕性質。但是因為該多元 HEA 同時包含 Cr、Al、Ti 等 BCC 相穩定元素，以及 Ni、Co、Cu 等 FCC 相穩定元素⁽⁴⁾，因此 Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni 系列高熵合金的鑄造態，多為 BCC 與 FCC 兩相共存，兩相的量以及分佈形貌主要跟合金組成有關。另外，因為 HEA 常具有多相或有非晶相，及奈米析出物伴隨產生，因此不同組成相之間所形成的伽凡尼效應常不可避免，其中合金元素 Al 及 Cu 為 BCC 穩定元素，隨著 Al 和 Cu 含量的增加，會形成較多的 Cr 缺乏的 BCC 相，因而造成此類高熵合金隨著 Al 及 Cu 含量增加，其抗氯離子孔蝕能力及抗硫酸均勻腐蝕能力皆隨之下降。綜合文獻結果可知，多元 HEA 擁有特殊的顯微組織、優越的機械性質⁽³⁾、良好的耐蝕性⁽⁶⁾、高熱穩定性⁽⁷⁾等，皆與高熵合金的合金組成相關，然而當 HEA 材料暴露於具腐蝕性環境使用，常因材料微結構、機械應力以及環境腐蝕因子三者交互作用而造成應力腐蝕破裂 (Stress Corrosion Cracking, SCC)，不過在 HEA 的研究中僅有非常少的文章討論應力腐蝕或是腐蝕磨耗的影響⁽⁸⁻¹⁰⁾，因此本研究使用腐蝕磨耗儀 (Tribocorrosion kit) 探討兩種熱處理對 Ni₂CoCrFeAl_{0.5} 高熵合金於 3.5wt% NaCl 水溶液中的一般腐蝕與腐蝕磨耗造成的應力腐蝕行為的影響，並與 304 不銹鋼 (304SS) 及 Inconel 718 超合金進行比較，以探討本研究之新穎 Ni₂FeCoCrAl 高熵合金的抗腐蝕特性。

2. 實驗方法

2.1. 試片準備與熱處理

將均質化處理的304不銹鋼(304SS)、均質化處理的Inconel 718超合金(Inconel 718)、真空鑄造之HEA試片切割至34 mm x 34 mm x 3 mm的尺寸, 接著依序利用180、400、800、1500、2500號數碳化矽砂紙研磨表面, 並使用粒度1 μm與0.3 μm 的Al₂O₃拋光液進行拋光, 最後將試片浸於丙酮溶液, 以超音波振洗將表面髒污去除, 並以洛氏硬度儀測量其平均硬度。HEA試片分別進行均質化退火(置於真空管爐升溫到1050°C, 持溫一小時後水淬, 試片編號HEA-1050), 以及均質化與時效熱處理(置於真空管爐升溫到700°C, 持溫24小時後水淬, 試片編號HEA-700)。各試片再用洛氏C硬度計測量平均硬度。

2.2. 一般腐蝕實驗

本研究使用恆電位儀(Potentiostat SP-200, Bio-Logi, France), 在3.5wt% NaCl水溶液中進行上述四種試片的一般靜態(無外加應力)之動電位極化腐蝕試驗, 使用Ag/AgCl作為參考電極、白金作為輔助電極, 腐蝕測試的掃描範圍為開路電位(OCP)以下0.3V至以上2V, 掃描速率為5 mV/s。

2.3. 乾磨耗與磨耗腐蝕實驗

本研究使用腐蝕磨耗儀(Tribocorrosion kit, Anton Paar, Austrian, 示意圖如圖1所示)進行腐蝕磨耗(應力腐蝕)的研究, 腐蝕磨耗各階段的測試如圖2所示。將上述四種試片分別浸泡於3.5 wt.% NaCl水溶液中, 使用氧化鋁球為磨耗測試的對磨材, 磨耗之施加荷重2N, 轉速100 rpm。本實驗記錄四種材料於施加荷重磨耗實驗過程(圖2的第7階段)的動電位極化腐蝕數據, 以判斷磨耗應力對於各試片抗腐蝕能力的影響。本實驗亦針對乾磨耗(無腐蝕環境)條件做測試, 並記錄個試片的重量變化, 以分別比較乾磨耗實驗與磨耗腐蝕前後的各試片重量損失量。

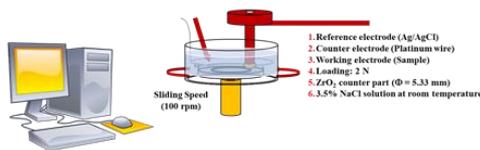


圖1. 腐蝕磨耗儀架構圖

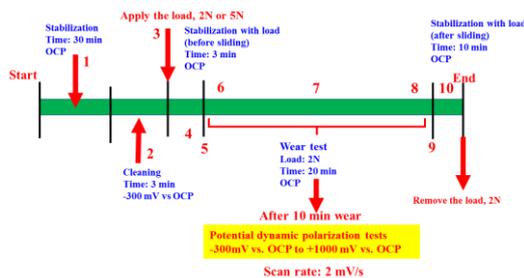


圖2. 腐蝕磨耗實驗測試階段

2.4. 磨耗體積與重量變化測量

本實驗利用白光干涉儀與掃描式電子顯微鏡觀察以上四種試片經過腐蝕磨耗測試之後的表面腐蝕行為與磨損情形, 並測量其磨耗體積。

3. 結果與討論

3.1 真空熔煉高熵合金之化學成分與晶相

表1是使用場發射電子微探儀分析Ni₂CoCrFeAl_{0.5}高熵合金(編號HEA-1050與HEA-700)、304不銹鋼與Inconel 718的化學成分, 圖3為兩種不同熱處理之HEA、304不銹鋼與Inconel 718超合金的X光繞射圖, 可發現四種材料都是FCC結構。

表1. 高熵合金、304不銹鋼與Inconel 718之化學成分 (單位 at.%)

Sample	Ni	Fe	Co	Cr	Al	Ti	Others
HEA	35.89±0.77	19.06±0.06	19.06±0.06	17.02±0.38	9.19±0.10	-	--
304SS	7.72	70.70	-	19.54	--	--	1.15 Si, 0.88Mn
Inconel 718	54.12	18.47	-	20.90	0.57	1.26	0.81Mo, 3.64Nb, 0.14C

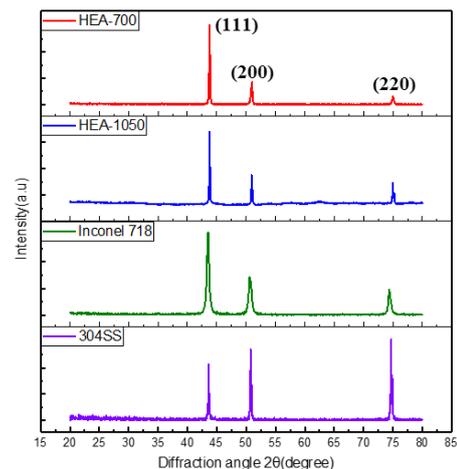


圖3. 高熵合金、304不銹鋼與Inconel 718之X光繞射圖

3.2 不同熱處理對高熵合金微結構的影響

圖4是HEA-700與HEA-1050試片表面的微結構光學顯微鏡與掃描式電子顯微鏡照片, 從圖4(a)可看出HEA-700試片有最小的晶粒尺寸, 計算之晶粒尺寸分別為3.53±0.79 μm與7.85±1.22 μm。從放大圖看出HEA-700試片經過700°C時效熱處理之後, 在晶界出現非常細小的Ni₃Al析出物(箭頭指的區域), 析出物阻礙晶界移動, 因此使晶粒無法成長。根據硬度分析顯示, 700°C時效熱處理可使Ni₂FeCoCrAl高熵合金產生析出強化而將其硬度從HRB75.7提升到HRB93.3, 而304不銹鋼與Inconel 718的硬度分別是HRB87.1與HRB95.0。

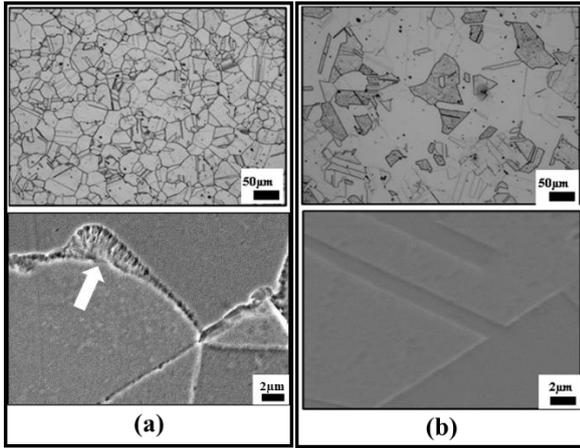


圖4.高熵合金經過(a)時效熱處理(HEA-700)與(b)均質化熱處理(HEA-1050)之微結構照片

3.3 一般腐蝕試驗

四種試片在3.5wt% NaCl水溶液中進行一般(無外加應力)之動電位極化腐蝕試驗結果如圖5所示,根據實驗數據計算各試片的腐蝕電位(E_{corr})、腐蝕電流密度(I_{corr})與腐蝕阻抗(R_p)數值列於表3。由表3的腐蝕阻抗(R_p)數據來看,304不銹鋼的抗腐蝕能力最差,而HEA #2-1050試片則具有最佳的抗腐蝕能力,其腐蝕阻抗(R_p)是304不銹鋼的10倍。抗腐蝕能力次佳的是Inconel 718超合金,再來則是HEA-700試片,其腐蝕阻抗(R_p)是304不銹鋼的3.3倍。值得注意的是Inconel 718超合金的鈍化區極寬廣,在電壓達到1.1 V仍未產生孔蝕。

3.4 腐蝕磨耗試驗

四種試片在3.5wt% NaCl水溶液中進行腐蝕磨耗測試之動電位極化腐蝕試驗結果如圖5所示,根據實驗數據計算各試片於進行磨耗過程的腐蝕電位(E_{corr})、腐蝕電流密度(I_{corr})與腐蝕阻抗(R_p)數值亦列於表4。比較一般腐蝕與腐蝕磨耗兩種不同狀態的各試片腐蝕阻抗數據可以明顯發現,HEA-700、HEA-1050、304不銹鋼與Inconel 718超合金的腐蝕阻抗分別降低成為原本一般腐蝕阻抗的0.04倍、0.02倍、0.05倍與0.02倍,分別是4070、5670、1690與4460 Ωcm^2 。從此數據可看出HEA-700與HEA-1050試片的抗磨耗腐蝕能力皆優於Inconel 718超合金與304不銹鋼。同樣的,Inconel 718超合金的鈍化區亦極為寬廣,在電壓達到0.9 V仍未產生崩潰的現象,顯示其鈍化層在具有磨耗應力作用之下仍有相當的保護性。

圖6和圖7是四種試片經過磨耗腐蝕測試之後的磨道之3D形貌圖與磨道截面輪廓曲線,各試片的磨道寬度、深度及根據白光干涉儀之3D形貌圖計算的磨耗體積與根據公式計算的磨耗率⁽¹¹⁾亦列於表5,從這些數據可看出304不銹鋼的磨道寬度、深度及磨耗率都是最大,因此其抵抗磨耗腐蝕能力最差,另一方

面,HEA-700的硬度高於HEA-1050,因此其抗磨耗的表現略優於HEA-1050試片,但是綜合考慮腐蝕與磨耗的雙重效應,HEA-1050的抗腐蝕磨耗能力仍然優於HEA-700者。硬度最高的Inconel 718超合金擁有最小的磨道寬度、深度及磨耗率,顯示其抵抗磨耗腐蝕能力仍略優於HEA-700與HEA-1050試片。

表3. 四種試片在3.5wt% NaCl水溶液中進行靜態腐蝕之試驗數據

Sample	Static corrosion			
	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R_p (Ωcm^2)	Ratio
HEA-700	-153.4	0.19	1.03×10^5	3.3
HEA-1050	-170.1	0.06	3.12×10^5	10.0
304SS	-119.3	0.45	3.11×10^4	1.0
Inconel 718	-54.4	0.15	2.01×10^5	6.5

表4. 四種試片在3.5wt% NaCl水溶液中進行腐蝕磨耗之試驗數據

Sample	Tribocorrosion			
	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R_p (Ωcm^2)	Ratio
HEA-700	-236.85	5.26	4.07×10^3	2.4
HEA-1050	-288.36	4.14	5.67×10^3	3.3
304SS	-167.89	14.02	1.69×10^3	1.0
Inconel 718	-148.42	4.94	4.46×10^3	2.6

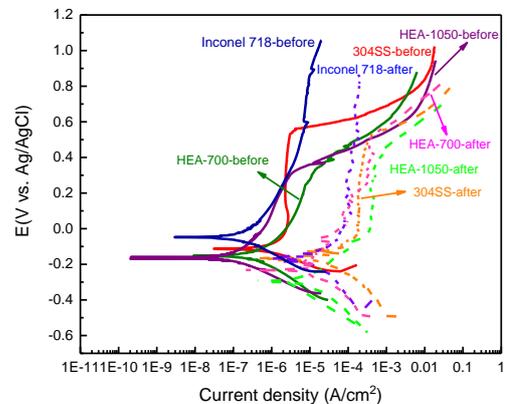


圖5. 四種試片在3.5wt% NaCl水溶液中進行一般腐蝕(無外加應力)與腐蝕磨耗過程的動電位極化腐蝕試驗曲線

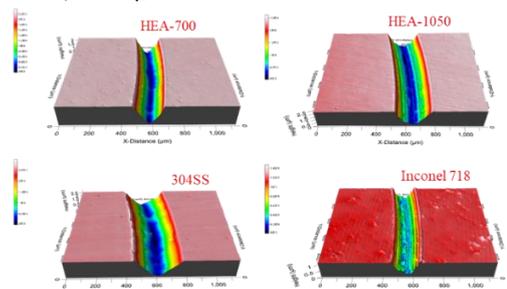


圖6. 四種試片腐蝕磨耗的磨道3D形貌圖

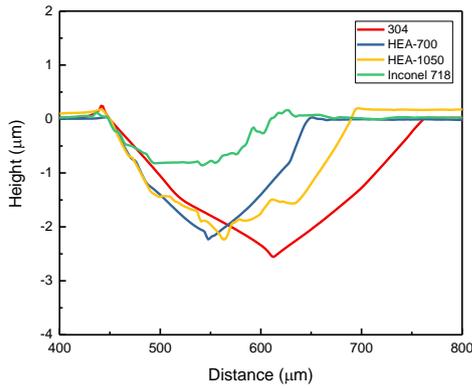


圖7. 四種試片腐蝕磨耗測試之後的磨道剖面圖

表5 四種試片在3.5wt% NaCl水溶液中進行磨耗腐蝕測試之硬度平均值、磨道寬度及深度

Sample	HEA-700	HEA-1050	304SS	Inconel 718
Hardness (HRB)	93.3 ± 1.1	75.7 ± 2.1	87.1 ± 1.2	95.0 ± 0.2
Wear track	Width (mm)	0.20 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.18 ± 0.02
	Depth (μm)	1.22 ± 0.09	1.95 ± 0.05	2.28 ± 0.09
Wear rate (mm ³ N ⁻¹ m ⁻¹)	1.1*10 ⁻⁶	3.3*10 ⁻⁶	2.6*10 ⁻⁶	6.4*10 ⁻⁷

3.5 磨耗腐蝕試驗後的微結構分析

圖8至圖11分別是 HEA-700、HEA-1050、304不銹鋼與Inconel 718超合金試片經過腐蝕磨耗測試之後的低倍率與高倍率的磨道形貌影像，相對來說，各試片的磨道表面都能看到研磨溝痕，腐蝕磨耗生成的氧化層裂痕，以及大小不等的蝕孔。在圖8 (b)的HEA-700試片影像可以看到較小尺寸的蝕孔；圖9 (b)的HEA-1050試片表面亦可看到許多氧化層的裂痕與較大尺寸的蝕孔；圖10 (b)的304不銹鋼試片表面亦可看到較多且較大的蝕孔生成；圖11 (b)的 Inconel 718超合金試片表面的蝕孔數目最少，尺寸也最小。

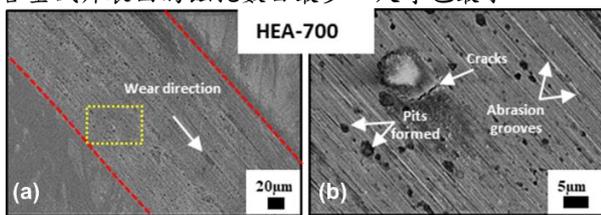


圖8. HEA-700試片經過磨耗腐蝕測試之後的(a)低倍率與(b)高倍率磨道形貌影像

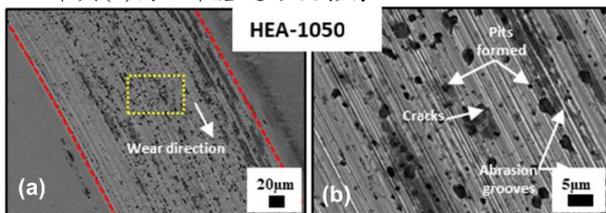


圖9. HEA-1050試片經過磨耗腐蝕測試之後的(a)低倍率與(b)高倍率磨道形貌影像

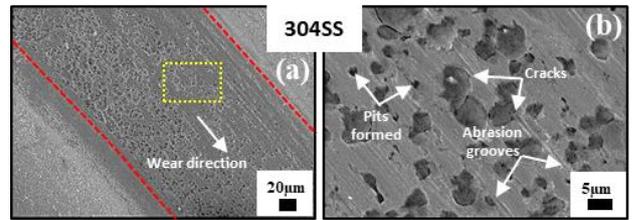


圖10. 304不銹鋼試片經過磨耗腐蝕測試之後的(a)低倍率與(b)高倍率磨道形貌影像

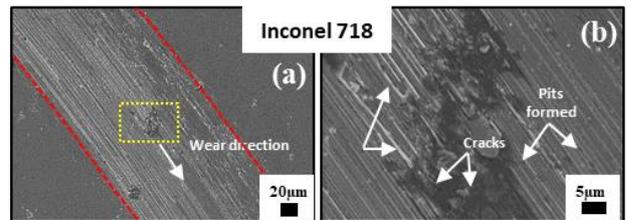


圖11. Inconel 718試片經過磨耗腐蝕測試之後的(a)低倍率與(b)高倍率磨道形貌影像

3.6 磨耗腐蝕的協同作用

本研究進一步使用ASTM G119⁽¹²⁾的規範來計算各試片的磨耗與腐蝕之間的協同作用，並用總材料損失率(T)評估其相互影響；總材料損失率(T)可用下式表示：

$$T = W_0 + C_0 + S \quad (1)$$

公式中的T等於單純磨耗之材料損失率(W₀)加上純腐蝕材料損失率(C₀)再加上腐蝕與磨耗的協同作用導致的材料損失率(S)。四種試片的計算結果列於表6。

根據表6結果顯示，304SS的總材料損失率最高，高達8.2332 mm/yr，HEA-1050的總材料損失率次之，為1.2603 mm/yr，Inconel 718有最低總材料損失率(0.5503 mm/yr)，略低於HEA-700的0.6741 mm/yr。仔細分析各項數據可知，304不銹鋼具有最大的純磨耗之材料損失率(W₀)與純腐蝕之材料損失率(C₀)，以及最大的腐蝕/磨耗協同材料損失率(S)，因此在具有應力環境的腐蝕環境當中表現最差。Inconel 718試片則因為硬度高，抗腐蝕性質佳，雖然其腐蝕/磨耗協同材料損失率高於HEA-1050者，但是其總材料損失率最低，顯示其抵抗腐蝕磨耗的能力極優。

另一方面，HEA-1050雖然具有最低的純腐蝕之材料損失率，以及最低的腐蝕/磨耗協同材料損失率，然而因為其硬度太低，造成較大的純磨耗材料損失率以及較高的總材料損失率(T)，因此在應力腐蝕環境的表現不佳。而經過析出熱處理硬化的HEA-700試片，因為硬度較高而得到第二低的純磨耗材料損失率，略高於Inconel 718的純腐蝕材料損失率，以及略高於略高於Inconel 718的腐蝕/磨耗協同材料損失率，因此在具有應力環境的腐蝕表現與Inconel 718者接近。

因此本研究可以發現，採用700°C，24小時之時效熱處理可提升Ni₂FeCoCrAl高熵合金之硬度，雖然會降低其抗一般腐蝕的能力，但是在具有應力作用的腐蝕環境中，具有與Inconel 718相近的抗腐蝕磨耗性

能。

表6.四種試片之總材料損失率(T)與相關數據

Sample	Material loss rate, $\frac{mm}{yr}$						
	T	W ₀	C ₀	C _w	S	ΔC _w	ΔW _c
meaning	Total loss	Pure wear loss	Pure corrosion loss	Corrosion loss during wear	ΔC _w + ΔW _c	Change of corrosion loss due to wear	Change of wear loss due to corrosion
HEA-700	0.6741	0.5276	0.0018	0.0302	0.1447	0.0284	0.1164
HEA-1050	1.2603	1.2310	0.0006	0.0155	0.0287	0.0149	0.0138
304SS	8.2332	2.2722	0.0046	0.1468	5.9564	0.1422	5.8141
Inconel 718	0.5503	0.4345	0.0015	0.0274	0.1144	0.0260	0.0884

4. 結論

本研究探討1050°C均質化退火熱處理與700°C，24小時之時效熱處理分別對FCC結構的Ni₂FeCoCrAl高熵合金於3.5 %氯化鈉水溶液的靜態腐蝕與動態腐蝕磨耗特性的影響，並使用鎳基超合金Inconel 718與304不銹鋼作為對照材料，獲得以下結論：

- (1).700°C時效熱處理可使Ni₂FeCoCrAl高熵合金產生Ni₃Al析出相而將其硬度從HRB75.7提升到HRB93.3。
- (2).由於動態腐蝕磨耗的應力影響，使得各試片的動態腐蝕磨耗的腐蝕阻抗值比靜態腐蝕的阻抗值低了數十倍。經過1050°C均質化退火熱處理的高熵合金具有均勻的微結構，因此具有最佳的靜態耐腐蝕性。其次是Inconel 718、時效熱處理高熵合金與304不銹鋼。
- (3).根據腐蝕磨耗實驗結果顯示，硬度最高與抗蝕性佳的Inconel 718具有最低的總材料損失率(0.5503 mm/yr)，因此抵抗3.5%氯化鈉水溶液的腐蝕磨耗性能最佳，反之304不銹鋼因為抗蝕性最差與硬度較低，其總材料損失率高達8.2332 mm/yr，因此其抗腐蝕磨耗性能最差。而經過700°C時效硬化熱處理的高熵合金由於具有良好的耐腐蝕性和較高硬度，因此其總材料損失率為0.6741 mm/yr，其抗腐蝕磨耗能力略低於Inconel 718者，但是優於退火處理高熵合金(總材料損失率為1.2603 mm/yr)與304不銹鋼。本研究發現，採用700°C，24小時之時效熱處理可提升Ni₂FeCoCrAl高熵合金之硬度，因此具有與Inconel 718相近的抗腐蝕磨耗性能。
- (4)本研究所研發的FCC結構Ni₂FeCoCrAl高熵合金在均質熱處理後，具有優於鎳基超合金Inconel 718與304不銹鋼的靜態抗腐蝕能力。而在時效熱處理後對動態腐蝕磨耗的抵抗能力與鎳基超合金Inconel 718相當，因此極具有工業應用的發展潛力。

5. 參考文獻

[1] J.-W. Yeh, S.-K. Chen, S.-J. Lin, J.-Y. Gan, T.-S. Chin, T.-T. Shun, C.-H. Tsau, S.-Y. Chang, Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes, *Advanced Engineering Materials*, 6

(2004) 299-303.
 [2] J.W. Yeh, Recent Progress in High-entropy Alloys, *Ann. Chim. Sci. Mat.* 31(2006) 633-648.
 [3] S.G. Ma, Y. Zhang, Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy, *Materials Science and Engineering A* 532(2012) 480-486.
 [4] B. Gludovatz, A. Hohenwarter, D. Catoor, E. H. Chang, E. P. George, R. O. Ritchie, A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications, *Science* 345(2014) 1153-1158.
 [5] Y. P. Wang, B. S. Li, M. X. Ren, C. Yang, H. Z. Fu, Microstructure and compressive properties of AlCrFeCoNi high entropy alloy, *Materials Science and Engineering A* 491(2008) 154-158.
 [6] Y. Y. Chen, T. Duval, U. D. Hung, J. W. Yeh, H. C. Shih, Microstructure and electrochemical properties of high entropy alloys- a comparison with type-304 stainless steel, *Corrosion Science* 47(2005) 2257-2279.
 [7] W. H. Wu, C. C. Yang, L. W. Yeh, Industrial development of high-entropy alloys, *Annales De Chimie- Science des Matériaux* 31 (2006) 737-747.
 [8] Q. Zeng, Y. Xu, A comparative study on the tribocorrosion behaviors of AlFeCrNiMo high entropy alloy coatings and 304 stainless steel, *Materials Today Communications* 24(2020) 101261.
 [9] H. Liang, J. Miao, B. Gao, D. Deng, T. Wang, Y. Lu, Z. Cao, H. Jiang, T. Li, H. Kang, Microstructure and tribological properties of AlCrFe₂Ni₂W_{0.2}Mo_{0.75} high-entropy alloy coating prepared by laser cladding in seawater, NaCl solution and deionized water, *Surface and Coatings Technology* 400 (2020) 126214.
 [10] A. Ayyagari, C. Barthelemy, B. Gwalani, R. Banerjee, T. W. Scharf, S. Mukherjee, Reciprocating sliding wear behavior of high entropy alloys in dry and marine environments, *Materials, Chemistry and Physics*, 210(2018)162-169.
 [11] S. Ma, J. Procházka, P. Karvánková, Q. Ma, X. Niu, X. Wang, D. Ma, K. Xu, S. Veprek, Comparative study of the tribological behaviour of superhard nanocomposite coatings nc-TiN/a-Si₃N₄ with TiN, *Surface and Coatings Technology* 194 (2005) 143-148.
 [12] ASTM G119-09 Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion (2016)

Effect of heat treatment on the tribocorrosion behavior of Ni₂FeCoCrAl high entropy alloys

F.-R. Gan¹, I. Rahmadtulloh¹, B.-S. Lou^{2,3}, W.-C. Cheng⁴, J.-W. Lee^{*1,5,6,7}

¹ Department of Materials Engineering, Ming Chi University of Technology

² Chemistry Division, Center of General Education,
Chang Gung University

³ Department of Nuclear Medicine and Molecular
Imaging Center, Chang Gung Memorial Hospital

⁴ Department of Mechanical Engineering, National
Taiwan University of Science and Technology

⁵ Center for Plasma and Thin Film Technologies, Ming
Chi University of Technology

⁶ Department of Mechanical Engineering, Chang Gung
University

⁷ Plastic and Reconstructive Surgery, and Craniofacial
Research Center, Chang Gung Memorial Hospital
Email: jefflee@mail.mcut.edu.tw
MOST Project No. MOST-109-2224-E-011-001

Abstract

High entropy alloys have attracted lots of attentions from researchers and industries since reported in 2004 due to their unique high entropy effects, which make them exhibit high strength, excellent anticorrosion and high temperature oxidation resistance. In this study, effects of homogenization annealing treatment at 1050°C and the aging heat treatment at 700°C for 24 hours on the tribocorrosion behaviors of FCC structured Ni₂FeCoCrAl high entropy alloys (HEAs) were investigated. The Ni-based superalloy Inconel 718 and 304 stainless steel (SS) were also used for comparison. The hardness of HEA was increased from HRB73.5 to HRB93.3 after the aging heat treatment at 700°C for 24 hours because of the precipitation hardening of Ni₃Al phase. The order of corrosion resistance at static condition was annealed HEA, Inconel 718, aged HEA and 304SS. On the other hand, Inconel 718 had the best tribocorrosion resistance because of its lowest total materials loss rate of 0.55 mm/yr after the tribocorrosion test in 3.5 wt.% NaCl aqueous solution. The aged HEA exhibited a comparable total materials loss rate (0.67 mm/yr), which was better than the annealed HEA (1.26 mm/yr) due to its higher hardness. The 304SS had the highest total materials loss rate of 8.23 mm/yr. We can conclude that the aging heat treatment of Ni₂FeCoCrAl HEA at 700°C for 24 hours can effectively improve its hardness and tribocorrosion resistance due to its precipitation hardening effect.

Keywords: Homogenization annealing, aging treatment, Ni₂FeCoCrAl high entropy alloy, Ni-based superalloy Inconel 718, tribocorrosion