



防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>



10.6376/JCCE.202103_35(1).0002

鎳基超合金 Haynes 282 在 950°C 之初期空氣中高溫氧化行為研究 The Study of Incipient Oxidation Behavior of Haynes 282 Ni-based Superalloy in Air at 950°C

陳廷秝¹、藍貫哲^{*2,1}、董曉明³
Ting-Li Chen¹, Kuan-Che Lan^{*2,1}, Hsiao-Ming Tung³

中文摘要

鎳基超合金 Haynes 282 為先進超超臨界(A-USC)燃煤發電系統的候選結構材料。本研究利用熱重分析儀(TGA)對 Haynes 282 進行 950°C 下 24 小時的增重行為分析，並利用箱型爐進行 950°C 高溫空氣中進行 12 至 96 小時之氧化，探討該溫度下的氧化動力學，其增重結果符合拋物線曲線。此外，使用 X 光繞射儀(XRD)探討 282 合金氧化層內的相組成及結晶結構。利用帶有特徵 X 光能譜分析儀(EDS)之場發射掃描式電子顯微鏡(FEG-SEM)對其氧化層進行表面微結構觀察與成份分析，並利用帶有 EDS 的聚焦離子束電子束掃描式顯微鏡(FIB-SEM)對初期高溫氧化試片進行截面觀察與成分分析。

關鍵詞：鎳基超合金、火力發電、高溫氧化、氧化層厚度。

Abstract

Haynes 282, a nickel-based superalloy, is a candidate structural material for advanced ultra-supercritical (A-USC) coal-fired power generation systems. In this study, the thermogravimetric analyzer (TGA) was used to analyze the weight gain behavior of Haynes 282 at 950°C for the exposure time of 24 hours, and a box furnace was used to perform the air oxidation test of Haynes 282 at 950°C from 12 to 96 hours. The studies of oxidation kinetics revealed that both results correspond with the parabolic curve. In addition, the crystal structure of oxide layer on the specimens of 282 alloy surface were characterized by X-ray diffraction (XRD). A field emission

收到日期：109 年 10 月 08 日

修訂日期：109 年 11 月 06 日

接受日期：109 年 11 月 30 日

¹ 國立清華大學 工程與系統科學系

¹ Department of Engineering and System Science, National Tsing-Hua University

² 國立清華大學 核子工程與科學研究所

² Institute of Nuclear Engineering and Science, National Tsing-Hua University

³ 行政院原子能委員會 核能研究所 核子燃料及材料組

³ Nuclear Fuels and Materials Division, Institute of Nuclear Energy Research, Atomic Energy Council, Executive Yuan

*聯絡作者：kclan@mx.nthu.edu.tw

scanning electron microscope (FEG-SEM) with characteristic energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and the dual beam focused ion beam (FIB) system was used to observe the microstructure and composition analysis of the surface of the oxide layer.

Keywords: Ni-based alloy; Coal-fired power; High temperature oxidation; Scale thickness.

1. 前言

我國的電力來源高達 98%仰賴進口，為因應節能減碳訴求，並改善發電成本控制而更新主要基載電力之火力發電機組，如林口、大林電廠皆已更新為超超臨界系統。為落實節能減碳目標，對先進型超超臨界(A-USC)火力發電系統的需求更是有迫在眉睫，而瓶頸之一取決於新結構材料在高溫下仍有良好的機械性質以及抗腐蝕能力。上述超超臨界系統工作環境之主蒸汽溫度及壓力在 566°C 及 24.1MPa 以上，所使用材料主要為肥粒鐵系材料和沃斯田鐵材料^[1]。A-USC 發電工作環境更推升為 700-760°C 以及蒸氣壓力 30-38 MPa，如此極端環境下的首選材料為鎳基超合金材料^[2]，目前被應用作航太領域的渦輪引擎元件或能源系統組件、蒸氣機葉片、轉子與管路材料。其中 Haynes 282 是一種新興的鎳基超合金，在高溫環境下具備優異的機械性質，在 760°C 下 10 萬小時潛變斷裂強度超過 100 MPa^[1]，並透過添加鉻、鈦、鋁等元素在高溫下形成表面氧化層^[3,4]，成為美歐日等國對於 A-USC 燃煤發電系統的汽機候選結構材料。

為了能源系統的長期運轉可靠度，乃至於意外事故的情境下，對於合金高溫腐蝕之耐受程度進一步探討，確保材料在嚴苛環境下的工作性能有更全面了解至關重大。本研究目的為對於鎳基超合金 Haynes 282 進行高溫空氣氧化實驗，進行實驗前後氧化增重與微結構分析，期望提供未來 A-USC 系統設計，運轉安全，以及面對意外事故的關鍵參數。

2. 實驗方法

2.1 樣品準備

本研究所使用之鎳基超合金 Haynes 282 來自 Haynes International 公司，其成分如附表一所示。

表 1 Haynes 282 之化學成分表 (wt%)。
Table 1 The composition of Haynes 282 alloy in this study (wt%).

Ni	Al	Ti	B
Bal(57.1)	1.51	2.22	0.005
Mn	Mo	Ta	Zr
0.06	8.51	0.011	0.003
C	Co	Cr	Fe
0.063	10.23	19.52	0.78
Cu	P	S	Si
<0.01	<0.002	<0.002	<0.05

實驗前超合金先進行二階段時效處理，先加熱至 1010°C 持溫 2 小時後空冷至室溫，再加熱至 788°C 持溫 8 小時後空冷至室溫^[5]。熱處理後超合金再以線切割放電加工法裁切為 10×10×1.2 mm 氧化實驗用試片，表面經碳化矽砂紙拋光，從 P80、P240、P400、P1200、P2000 至 P4000，再將試片置於丙酮與甲醇中以超音波震盪清洗各五分鐘，再經熱風槍乾燥後，利用 Sartorius_CPA225D 微量天秤量測原始試片重量，精確度至 0.01 mg。

2.2 高溫氧化實驗

本研究使用箱型爐進行長時間之 950°C 空氣氧化試驗。將試片斜立於氧化鋁坩鍋上使其兩面均勻暴露於高溫空氣中。首先以速率 15°C/min，升溫至 600°C 並持溫 10 分鐘後，再以速率 6°C/min 升至 950°C 並持溫 30 分鐘之後開始計算氧化暴

露時間 從 12 至 96 小時 待樣品空冷至室溫後，取出秤重。另外，為了探討初期氧化行為，利用 Setaram SETSYS Evolution 熱重分析儀 (Thermogravimetric Analyzer, TGA) 進行相同溫度增重實驗。首先將樣品置於石英坩鍋中，以白金絲懸吊於微量天平實驗端，接著將 20 ml/min 之瓶裝乾空氣通入實驗爐體，再以 50°C/min 由室溫升溫至 950°C，對 Haynes 282 樣品進行增重行為分析達 24 小時後爐冷至室溫。

2.3 X光繞射分析

為了分析其氧化層結構內之結晶種類，以 Bruker D2 PHASER X 光繞射儀，掃描高溫氧化前後之試片。X 光源來自銅靶的 $K\alpha$ 之 X 光，工作電壓及電流分別為 30 kV 以及 10 mA， 2θ 的量測範圍在 20°到 95°之間，掃描速度為 0.05°/s。

2.4 氧化前後之表面形貌分析

為了探討 Haynes 282 試片氧化實驗前後表面的表面形貌，藉此探討氧化物形成與合金 282 母相晶界的關係，本研究以光學顯微鏡(OM) Olympus 4000 進行巨觀形貌觀察，並利用其將不同深度對焦後進行疊圖處理以拓展影像景深。而為了進一步對於表面的微結構觀察與表面成分分析，利用配備特徵 X 光能譜分析儀(EDS)的高解析熱場發射掃描式電子顯微鏡(HRFEG-SEM), JEOL JSM-7610F 進行觀察。

2.5 氧化初期截面之微結構與成分分析

為精確觀測氧化層分層結構，以配備 EDS 的聚焦離子束電子束掃描式顯微鏡(FIB-SEM, FEI Helios Nanolab 600i System)對 950°C 下暴露 12 小時後的初期氧化試片進行氧化層截面觀察，並利用 EDS 分析其氧化層由外到內的化學組成。

3. 結果與討論

3.1 Haynes 282 之高溫氧化動力學

950°C 下 Haynes 282 長時間高溫氧化之增重結果經數據整理後可發現，在 950°C 下 Haynes 282 之高溫氧化遵守拋物線定律^[4]，可利用下列之公式表示：

$$\Delta W = k_p \times t^{0.5} \quad (1)$$

ΔW 為試片每單位面積重量變化，單位為 mg/cm^2 ； k_p 為拋物線氧化係數，單位為 $\text{mg} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-0.5}$ ； t 為暴露時間，單位為小時(h)。此現象表示該合金的氧化行為受到內部合金元素原子向外擴散及氣體分子向內擴散的通量影響，且其擴散速率決定合金之氧化速率。經計算後，得到 Haynes 282 在 950°C 下之 $k_p = 0.11 \pm 0.01 \text{ mg} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-0.5}$ ，並以此參數繪出如圖 1 紅線所示之趨勢線，與 Pérez-González 等人在 800 - 1000°C 靜止空氣中氧化所得之 k_p 數值^[3]相比高了 4 個數量級，造成差距推測原因可能有二：

- (1) 實驗氣氛中溼氣含量不同，文獻中沒有提供，本研究所用氣瓶含水量低於 10 ppm。
- (2) Haynes 282 原料因製程參數差異對氧化行為造成影響。

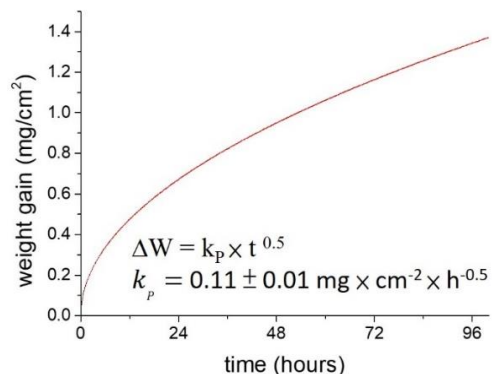


圖 1 Haynes 282 950°C 高溫氧化增重對於時間之趨勢線關係圖。

Figure 1 The relationship between the oxidation in terms of weight gains and exposure time of Haynes 282 in air at 950°C.

3.2 X光繞射分析

圖 2 為 Haynes 282 的原始試片以及經 950°C 下 12 小時至 96 小時氧化後之 XRD 繞射分析結果。在 20° 到 95° 的 2 θ 掃描範圍內，282 合金氧化前出現四個結晶方向的繞射峰。經比對 PDF No.04-0850 後符合母相 Ni 面心立方結晶的(111)、(200)、(220)、(311)四個結晶平面之繞射結果。

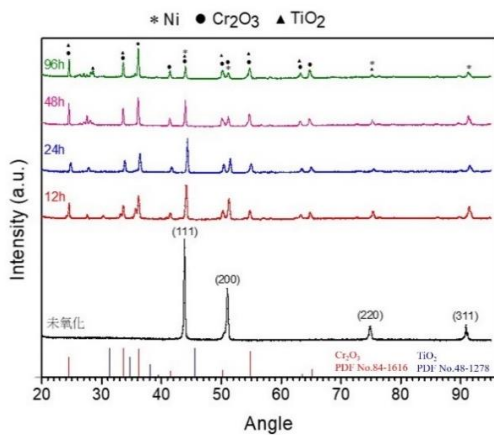


圖 2 Haynes 282 950°C 高溫氧化前後之 X 光繞射分析結果。

Figure 2 Pre-/Post XRD θ -2 θ analysis of Haynes 282 in air at 950°C espoused for various time.

隨著氧化暴露時間的增加，繞射峰 2 θ 位置大致相同，母相 FCC-Ni 四個繞射峰強度隨之降低，可知氧化層是隨時間增加而逐漸增厚。即使高溫氧化實驗進行到 96 小時仍出現 Ni 基母相的繞射譜，表示氧化層厚度仍小於 X 光繞射儀可測量之穿透深度。經分析圖 2 之 XRD 圖譜後得知，Haynes 282 的氧化層主要組成為 Rhombohedral- Cr_2O_3 (JCPDS PDF #84-1616) 以及 Tetragonal- TiO_2 (JCPDS PDF #48-1278)，證明了該合金之高溫氧化機制包含了合金內元素的向外擴散，與向內擴散的氧原子參與反應。氧化物自由能圖(Ellingham diagram)顯示^[6]，合金 282 內所含元素所構成之氧化物在 950°C 下，穩定度由高到低分別為 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MnO 及 Cr_2O_3 ，未見到 Al_2O_3 及 MnO 之繞

射峰的原因可能是其在合金氧化過後的試片表面中的含量過低，或著是二種元素在鎳基中擴散速率較為緩慢，而不容易形成規律排列之晶體結構。

3.3 氧化前後之表面形貌與厚度分析

圖 3 為 Haynes 282 原始試片在光學顯微鏡下的金相觀察。圖中可看到析出物在母相 γ 中呈現帶狀分布，散布皆沿同一方向，推測應為熱滾軋過程中導致合金塊材內出現一定程度的織構。圖 4(a)-(d) 為 282 合金經 950°C 高溫氧化後的巨觀表面觀察。從 OM 上可看見氧化後的晶界分布，以及在晶界上方生成的大顆析出物，且析出物分布位置與圖 4 大致相同，亦是沿著單一方向呈條狀分布。圖 4(a)-(d) 已經做過景深處理，但在 OM 觀察時，晶界及析出物與大部分氧化層有一定程度的聚焦落差，顯示出 Haynes 282 在 950°C 下所形成的氧化層結瘤現象(nodulation)。圖 4 (e) 則可明顯看到氧化析出物顆粒呈單一方向帶狀排列，與圖 4 的析出物排列相似，推測可能是由原本 Haynes 282 經時效處理後表面所形成的碳化物氧化而來。

圖 5(a)-(d) 為 12h、24h、48h、96h 高溫氧化後的 282 合金表面微結構，不論晶粒或晶界上皆發生明顯氧化，晶粒內出現微小的粒狀氧化物，晶界上的氧化物則沿晶成長並突出表面形成結瘤，表示晶界為氧原子的擴散途徑^[7]。又，四個氧化暴露時間之試片，皆在原合金 282 的晶界附近形成許多氧化物顆粒，且其平均粒徑隨氧化時間增加而有成長的趨勢。由圖 5 的(a)-(d) 可發現，Haynes 282 隨氧化時間增加至 96 小時，表面氧化層成長的厚度已經使晶界較難分辨，且表面氧化層從原本遍佈細小顆粒轉變成不易分辨的片狀結構，表示其粗糙度亦隨之提高。利用 ASTM E112 號標準^[8]所計算得到 Haynes 282 經 12 至 96 小時氧化後之平均晶粒大小無顯著改變，如表 2 所示。圖 5

(e)-(h)為 12 至 96 小時氧化後，氧化層上出現的析出物局部放大圖。此氧化析出物粒徑隨暴露時間增加而成長，且表面皆呈現結晶狀的稜角。

圖 6 為 Haynes 282 950°C 高溫氧化 48 小時後之表面析出氧化物微結構 EDS 分析，其粒徑約 13 μm ，主要成分由 Ti 構成，並在表面偵測到 O、N、C 等微量元素，其帶狀分布的排列亦為圖 3 與圖 4(e)的觀察結果相互映證。圖 7 為 Haynes 282 950°C 高溫氧化 96 小時後之表面氧化層微結構 EDS 分析。合金 282 的氧化層表面化學組成大多如圖 7 所示，以 Cr 的氧化物為主要的氧化層結晶，而 Ti 的氧化物則呈現局部分布，這與 XRD 分析後的結果非常相近。Mn 也被偵測到出現在此合金的氧化層表面，且其分布大致上與 Cr 相同。圖 8 為 Haynes 282 950°C 高溫氧化 96 小時後之大範圍之表面氧化層微結構 EDS 分析。由圖 8 可看出，氧化層晶界上含 Cr 及 Mn，推測晶界的結瘤狀應為其氧化物結構。值得注意的是，Ti 在晶界附近大致分布平行於氧化層晶界，且其在晶界上出現明顯的匱乏區，反之晶界上主要化學組成為 Cr 及 Mn。圖二之 XRD 結果中 60-95°之內有數個繞射峰強度雖與背景強度非常接近，然而這些峰心可能的 2 θ 位置均非常接近於 MnCr_2O_4 (JCPDS PDF #75-1614) 結構晶面所導致的繞射位置，故對照圖七圖八之觀察結果，氧化層中可能亦存在極微量的 MnCr_2O_4 晶體。

圖 9 為 Haynes 282 950°C 高溫氧化 12 小時後之氧化初期截面微結構與 EDS Line Scan 分析圖。由圖 9 可看到，外氧化層粗糙度在此氧化階段已十分不平整，平均外氧化層厚度為 $3.226 \pm 0.284 \mu\text{m}$ ，外氧化層內有小顆粒(灰點)與孔洞(黑點)，內氧化層為深入 Ni 基母相的長條狀，最深距離達試片表面約 5.8 μm 。EDS 線掃描位置如圖 9(a)所示，長度為 6 μm ，其結果顯示於圖 9(b)。

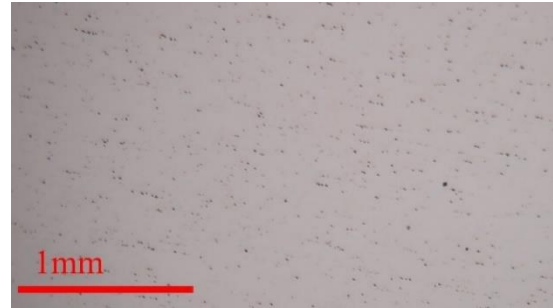


圖 3 Haynes 282 原始試片表面之巨觀金相。
Figure 3 Optical metallography of Haynes 282 surface after the 2 step-aging treatment.

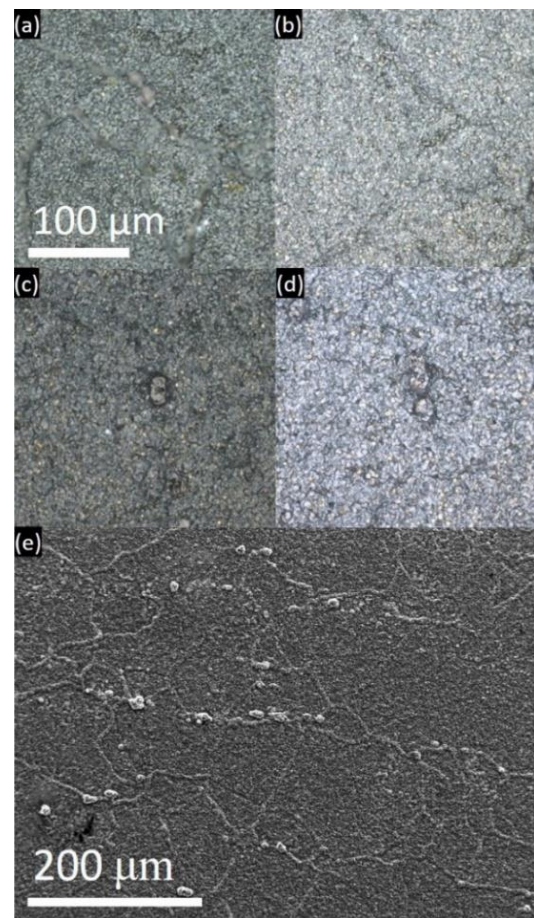


圖 4 Haynes 282 高溫氧化後在光學顯微鏡下的表面形貌 (a)12 (b)24 (c)48 (d)96 小時氧化及(e)在 SEM 下高溫氧化 24 小時後的表面析出物分布。

Figure 4 Optical images of surface morphology of Haynes 282 at high temperature exposed for (a)12 h, (b)24 h, (c)48 h, and (d)96 h. (e) The SEM image of alloy 282 with an exposure time 24 h, which exhibited the distribution of precipitation on the surface.

表 2 Haynes 282 氧化後平均晶粒尺寸。
Table 2 Averaged grain sizes (ASTM E112^[8]) of Haynes 282 oxidized at various period.

氧化時間(h)	12	24	48	96	平均
晶粒尺寸(μm)	102.9	112.5	105.9	100.0	

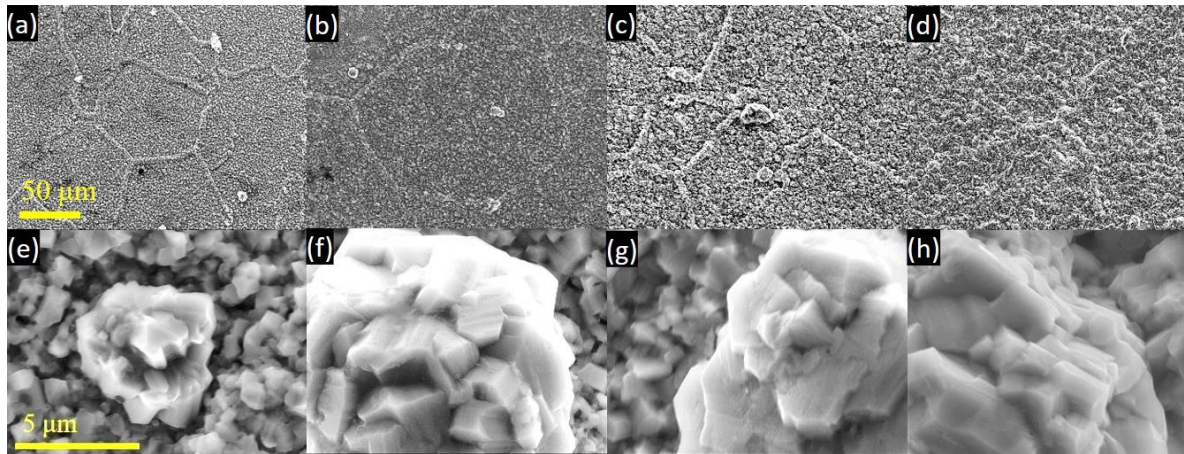


圖 5 Haynes 282 950°C 高溫氧化後之表面微結構，經(a)12 (b)24 (c)48 (d)96 小時，及表面析出物(e)12 (f)24 (g)48 (h)96 小時。

Figure 5 The surface features and the precipitation of Haynes 282 oxidized for (a) and (e) 12 h, (b) and (f) 24 h, (c) and (g) 48 h, and (d) and (h) 96 h.

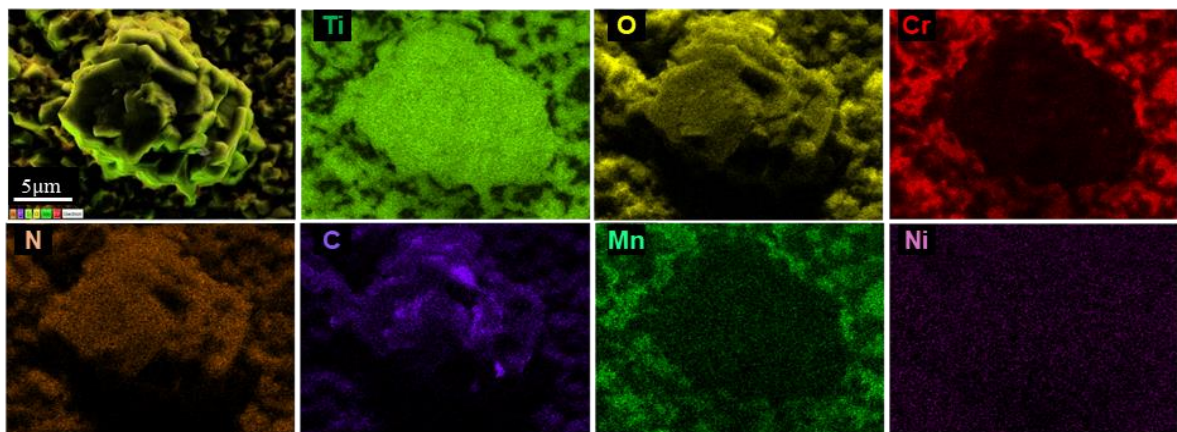


圖 6 Haynes 282 950°C 高溫氧化 48 小時後之析出物微結構 EDS mapping 分析圖。

Figure 6 The EDS mapping of the precipitation on the surface of Haynes 282 oxidized for 48 h.

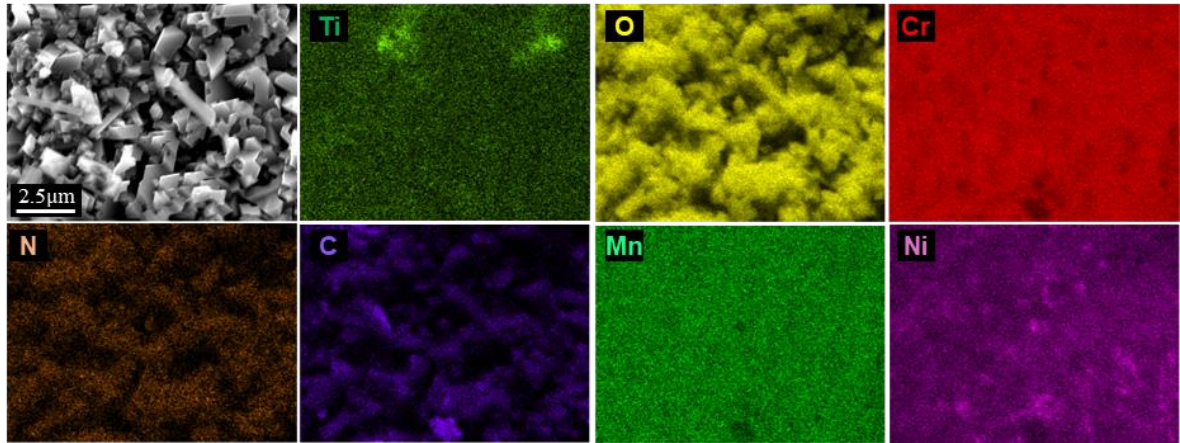


圖 7 Haynes 282 950°C 高溫氧化 96 小時後之表面微結構 EDS mapping 分析圖。

Figure 7 The EDS mapping analysis of the surface microstructure of Haynes 282 oxidized for 96 h.

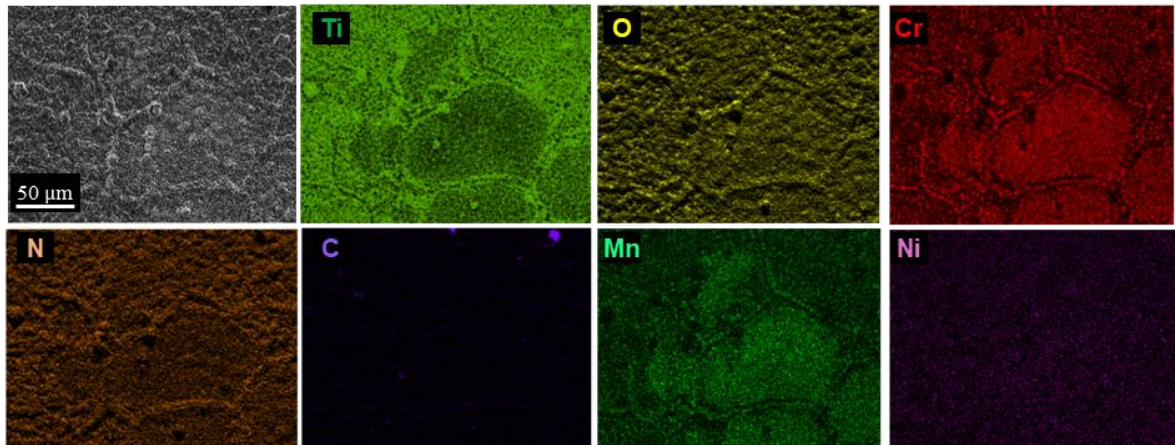


圖 8 Haynes 282 950°C 高溫氧化 96 小時後之表面微結構 EDS mapping 分析圖。

Figure 8 The EDS mapping analysis of the surface features with several grains of Haynes 282 oxidized for 96 h.

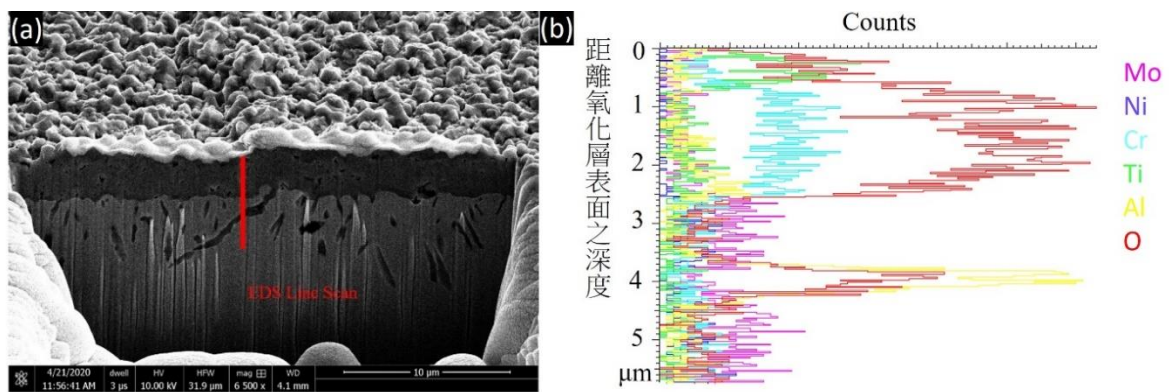


圖 9 Haynes 282 950°C 高溫氧化 12 小時後之氧化初期截面微結構與 EDS Line Scan 分析: (a) SEM 微區氧化層厚度與 EDS Line Scan 位置 (b) EDS Line Scan 分析。

Figure 9 (a) The cross-section image of Haynes 282 oxidized for 12 h acquired using FIB-SEM technique and (b) a corresponding EDS line scan analysis across the oxide layer from the surface to the matrix.

Haynes 282 的外氧化層主要分布元素為 Ti、Cr 以及 O，更內部則進入合金本身，主要化學組成來自 Ni 與 Mo，長條狀的內氧化層則為 Al_2O_3 結構^[9]。外氧化層的主要元素分析與圖 6-8 的結果相符，也與圖 2 之 XRD 所得到的結構分析主要為氧化層 TiO_2 、 Cr_2O_3 ，以及更內部之母相 Ni 的結果呼應。假設此氧化試驗的增重皆來自氧原子與合金的氧化反應，合金本身未損失任何質量，則實驗所量測到 ΔW 皆為 O 所提供。由 SEM Line Scan 配合 XRD 的觀察結果得知氧化層主要為 Rhombohedral- Cr_2O_3 以及 Tetragonal- TiO_2 之結構，且此二化合物之密度接近。若假設氧化層皆為 Cr_2O_3 之結構並假設氧化過程不產生揮發性物質，則根據 FIB 所得到的外氧化層厚度 δ ，Haynes 282 高溫氧化之每單位面積重量變化 ΔW (mg / cm^2) 應符合以下公式：

$$\Delta W = 0.1 \delta \times \rho_{\text{Cr}_2\text{O}_3} \times \frac{3 M_{\text{O}}}{M_{\text{Cr}_2\text{O}_3}} \quad (2)$$

其中 δ 為外氧化膜厚度(μm)， M 為質量數(g/mol)， $\rho_{\text{Cr}_2\text{O}_3}$ 為 Cr_2O_3 之密度(g/cm^3)^[10]。將平均氧化層厚度 $3.226 \mu\text{m}$ 帶入由此式(2)計算 12 小時之 ΔW ，與式(1)所量測之結果大致相符，意即氧化膜厚的增加符合氧化增重實驗量測結果。

內氧化層的形成表示合金 282 在 950°C 之高溫空氣中仍有氧原子可擴散穿透外氧化層，對合金內部造成腐蝕損傷。且 Al_2O_3 的形成意味原構成 γ' 析出物(Ni_3Al)的 Al 含量減少，其對於 Haynes 282 在 950°C 下工作的機械性質之影響仍有待討論。

4. 結論

1. Haynes 282 在 950°C 空氣中之高溫氧化，其氧化速率動力學符合拋物線定理，即 $\Delta W = k_p \times t^{0.5}$ ，其中 $k_p = 0.11 \pm 0.01 \text{ mgcm}^{-2}\text{h}^{-0.5}$ 。
2. Haynes 282 在 950°C 空氣中之高溫氧化所形

成的氧化層，經 XRD 分析後推測由 TiO_2 以及 Cr_2O_3 所構成。

3. Haynes 282 經 950°C 空氣中高溫氧化後，其氧化層上表面晶界與析出物顆粒發生明顯突起之結瘤現象。
4. 經 HRFEG-SEM 觀察 Haynes 282 經 950°C 空氣中高溫氧化後之氧化層表面，其晶粒內氧化層由細小顆粒轉變成片狀結構，平均晶粒大小為 $105.3 \pm 5.4 \mu\text{m}$ 。EDS 分析後發現晶粒及晶界上之氧化層以 Cr 為主要元素，而 Ti 則呈現局部分布。Mn 元素也被發現分布在和 Cr 相近的位置，另外 Ti 在晶界附近大致分布平行於氧化層晶界，且其在晶界上出現明顯的匱乏區。
5. 經 FIB-SEM 觀察 Haynes 282 經 950°C 空氣中高溫氧化 12 小時後之氧化層截面，得到該暴露時間下之外氧化層平均厚度為 $3.226 \pm 0.284 \mu\text{m}$ ，符合氧化增重趨勢。內氧化層為深入 Ni 基母相的長條狀，最深距離達試片表面內約 $5.8 \mu\text{m}$ 。EDS 線掃描發現外氧化層主要分布元素為 Ti、Cr 以及 O，更內部則進入合金本身，主要化學組成來自 Ni 與 Mo，長條狀的內氧化層為 Al_2O_3 結構。

致謝

本研究由科技部先進型超超臨界技術之候選高溫鍋爐材料抗氧化薄膜發展計畫編號 MOST109-2222-E-007-001-MY2 補助支持。作者衷心感謝行政院原子能委員會核能研究所核子燃料及材料組的協助對於熱重分析儀 Setaram SETSYS Evolution，掃描式電子顯微鏡 JOEL JSM-7610F 以及 X 光繞射儀 Bruker D2 Phaser 的技術協助，特此感謝。

參考文獻

- [1] Birks, S., Roberts, S., and Leese, R. "Advances in materials technology for fossil power plants." *Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants - Proceedings from the 7th International Conference, 2014*, pp. 491-503.
- [2] "Processing of advanced cast alloys for A-USC steam turbine applications.", Jablonski, Paul D., et al., *Jom* 64.2 (2012) pp. 271-279.
- [3] "High temperature oxidation of the Haynes 282[®] nickel-based superalloy.", Pérez-González, F. A., N. F. Garza-Montes-de Oca, and R. Colás., *Oxidation of metals* 82.3-4 (2014) pp. 145-161.
- [4] Birks, Neil, Gerald H. Meier, and Frederick S. Pettit, in: *Introduction to the high temperature oxidation of metals* (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2006).
- [5] "Effects of heat treatment on the microstructure evolution and the high-temperature tensile properties of Haynes 282 superalloy.", Shin, Kyeong-Yong, et al., *Materials Science and Engineering: A* 751 (2019) pp. 311-322.
- [6] "Metallurgical thermochemistry", Kubaschewski, O., E. L. Evans, and Earl A. Gulbransen., *Journal of The Electrochemical Society* 104.1 (1957): 22C.
- [7] "Phase investigations under steam oxidation process at 800°C for 1000 h of advanced steels and Ni-based alloys.", Dudziak, T., et al., *Oxidation of Metals* 87.1-2 (2017) pp. 139-158.
- [8] American Society for Testing and Materials. "E112-13: standard test methods for determining average grain size.", 2013.
- [9] "High temperature oxidation of Fe–Ni-base alloy HR120 and Ni-base alloy HAYNES 282 in steam.", Liang, Zhiyuan, and Qinxin Zhao., *Materials at High Temperatures* 36.1 (2019) pp. 87-96.
- [10] J.Rumble, in: *Handbook of Chemistry and Physics* 100th Edition (CRC Press, Florida, USA, 2019)