

魏 豐 義

中國鋼鐵公司研究發展處

一、前言：

目前高溫腐蝕在許多先進國家已經普遍受到重視，因在高溫狀態操作的鍋爐、核能發電設備及引擎，和焚化爐等均會發生高溫腐蝕現象，另外在許多工業製程上，亦有此些問題發生，如表 1 和

2 所示⁽¹⁾。高溫腐蝕一般分為：(1)氣體和金屬材料的作用 (Gas-metal reaction)，如：sulfur, hydrogen sulfide, oxygen 等和鋼材發生反應，造成腐蝕問題。(2)熔融鹽類和金屬的作用，如：煤燃燒，其所含的硫化物會和鹼金屬或鹼土金屬生成熔融鹽類，此

表 1 在冶金製程，工業上之熱處理和玻璃製造上的高溫腐蝕問題⁽¹⁾

製程一元件	溫度範圍	環境或腐蝕形態
Aluminum remelting-Recuperators	Up to 1800°F (980°C)	Flue gas with salts, halogen, sulfur, etc.
Steel forging-Recuperators	Up to 2200°F (1200°C)	Oxidation
Steel reheating-Recuperators	Up to 2200°F (1200°C)	Fuel ash corrosion
Mineral calcining-Calciners	Up to 2200°F (1200°C)	Oxidation. Sulfidation, Halogen
Si, SiO ₂ and TiO ₂ -Reactor vessels	> 1000°F (540°C)	Halogen-bearing
Pottery kilns-Kiln components	Up to 2200°F (1200°C)	Oxidation
Heat treating-Radiant tubes	Up to 2000°F (1090°C)	Oxidation
Strand annealing-Furnace tubes	Up to 2000°F (1090°C)	Accelerated oxidation by Ca and others from drawing compounds
Gas carburizing-Furnace components	Up to 2000°F (1090°C)	Carburization
Gas carburizing-Furnace brick anchors, fan housing assemblies	1000-1500°F (540-820°C)	Metal dusting
Heat treating-Molten salt pots	1550°F (840°C)	Molten salt attack.
Fiberglass production-Recuperators	Up to 2200°F (1200°C)	Flue gas with salts. sulfur, alkali metals. etc.
Fiberglass production-spinners, melting pots	Up to 1800°F (982°C)	Molten glass attack / sulfidation

表2 在化學和石化製程、垃圾焚化爐和幫浦和紙工業上之高溫腐蝕問題⁽¹⁾

製程—元件	溫度範圍	環境或腐蝕形態
Chlorinated organic compounds- pyrolysis furnace tubes	1300°-1500°F (700°-815°C)	Halogen-bearing
Carbon regeneration-Grids and other internals	Up to 1800°F (980°C)	Oxidation/Carburization
Phosphorus production-Reactor internals	Up to 1500°F (816°C)	Reactions with P ₂ O ₅ / oxidation
Ethylene cracking and Steam reforming Pyrolysis tubes, pigtaills	Up to 2000°F (1090°C)	Oxidation/Carburization
Petroleum coke calcining- Recuperators	Up to 1600°F (871°C)	Sulfidation
Waste incineration boilers - Internals. Superheater tubes	Up to 1800°F (980°C)	Flue gas with salts, sulfur, Zn. Pb, etc.
Waste pyrolysis furnace-Screw conveyors and other internals	Up to 1500°F (816°C)	Flue gas with salts. sulfur, etc.
Pulp and paper recovery boilers - Smelt spouts	1500°-1700°F (820°-927°C)	Molten salt attack
Palp and paper recovery boilers - Superheaters, internals	Up to 1800°F (980°C)	Flue gas with salts, sulfur, etc.

表3 純金屬鹽之熔點

鹽	熔點(°C)	鹽	熔點(°C)
LiCl	613	NaNO ₂	271
NaCl	801	Li ₂ SO ₄	857
KCl	776	K ₂ SO ₄	1076
NaF	998	K ₃ Fe(SO ₄) ₃	618
NaOH	318	K ₃ Al(SO ₄) ₃	654
KOH	360	Na ₃ Fe(SO ₄) ₃	624
K ₂ CO ₃	891	Na ₃ Al(SO ₄) ₃	646
Na ₂ CO ₃	858	KFe(SO ₄) ₂	694
KNO ₃	334	NaFe(SO ₄) ₂	690

表 4 共熔融鹽類之熔點

熔 融 鹽 系	組 成 (mole %)			熔點 (°C)
	A	B	C	
LiCl - KCl	59.5	40.5	—	352
NaCl - KCl	50.0	50.0	—	670
LiF - NaF - KF	46.5	11.5	42.0	454
NaNO ₃ - KNO ₃	50.0	50.0	—	220
Li ₂ CO ₃ - Na ₂ CO ₃ - K ₂ CO ₃	43.5	31.5	25.0	397
Na ₂ SO ₄ - K ₂ SO ₄	80.0	20.0	—	830
Li ₂ SO ₄ - K ₂ SO ₄	71.6	28.4	—	535
NaHSO ₄ - KHSO ₄	53.5	46.5	—	125

些鹽類會把鋼管表面具有保護作用的氧化膜熔蝕掉，造成腐蝕，這是許多鍋爐普遍會有的問題。一般鍋爐因噴嘴 (Burner) 位置不同，而有不同的溫度，也就有不同類型的腐蝕，如：噴火嘴正對面，因火焰直接噴射，於表面會形成 Molten salt 的腐蝕，鍋爐內一般均會有液體的熔融鹽和硬的氧化物或硫化物積在鋼管表面，高溫時會把鋼管熔解，低溫時聚集在鋼管裡面，氣體無法通過。

越戰期間，用於海上飛行之飛機，其所用之引擎壽命約為內陸飛行的 2/3，主要為海面上鹽份含量很高，飛機引擎所用的油含硫成份稍高一點，就會生成硫酸鹽 (sulfate)，然後和 NaCl 在高溫時生成熔融鹽類，把渦輪和引擎組件上的氧化膜熔解，造成腐蝕。另外在核子反應器中，高溫、高壓含有氧的水亦會對 Ni, Co 合金造成應力腐蝕。

二、氣體和金屬的作用

(Gas-metal reaction)

金屬表面一般均會生成氧化物，如： $\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3$ ， $\text{Fe} \rightarrow \text{FeO}$ ， Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 ， $\text{Co} \rightarrow \text{CoO}$ ， Co_3O_4 等，而生成何種氧化物，端看溫度和氧的分壓來決定。金屬的氧化膜是由陽離子向

外擴散或陰離子向內擴散生成的，如擴散係數小，則生成的氧化膜就薄，而具有保護性；如果氧化膜厚，則因無法變形，就會因受氧化應力而破裂⁽²⁾，氧不須經氧化膜，可由隙縫進入，加速氧化。好的氧化膜，一般其缺陷 (Defect) 濃度要低，因離子的移動，均需藉著氧化膜中的缺陷。而在絕對溫度以上，一般氧化物裡面一定有缺陷，它可能是氧或金屬的空位 (vacancy) 或為氧或金屬的 Interstitial ions。氧化膜的生長，均看此些缺陷之濃度和缺陷的移動度 (Mobility)，若低，則生長速率就慢。

氧化膜不是均具保護性的，一般愈緊密，離子擴散速率小，氧化膜不易生長，也就不易破裂，且有較好之塑性變形能力者，保護性則較佳。就鐵而言， Fe_3O_4 之保護性較 FeO 為佳，另外 Cr_2O_3 ， Al_2O_3 和 SiO_2 之氧化膜保護性就很好，因其缺陷濃度低，雖然在冷熱循環中，因熱應力之故亦會剝落⁽²⁾。

在溫度一定，生成何種氧化物，和氧氣的分壓有關。如於 900°C 時， Fe_2O_3 與 Fe_3O_4 ， Fe_3O_4 與 FeO ， FeO 與 Fe 間的界面氧的平衡分壓分別為 $6.76 \times 10^{-8} \text{ atm}$ ， $1.21 \times 10^{-15} \text{ atm}$ 和 $2.03 \times 10^{-17} \text{ atm}$ (此可由熱力學的資料和公式來計算⁽³⁾)，即氧化膜從

外到裡面有氧氣分壓的下降。如果環境中的氧氣分壓比 1.21×10^{-15} atm 低，就不會生成 Fe_3O_4 ，只會有 FeO ；同樣的，比 6.76×10^{-8} atm 低時，也不會生成 Fe_2O_3 。所以要生成何種氧化物，得視氧的分壓而定。在 800°C ， Cu 和 Cu_2O ， Cu_2O 和 Cu_2S 之界面氧氣平衡壓力分別為 1.49×10^{-9} atm 和 1.34×10^{-3} atm。

氧化物的生成和溫度亦有關，如： FeO 在 570°C 以下是不穩定的，只有 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 才是穩定的。因此氧化物是否較具有保護性，要看生成那一種氧化物，而這氧化物的存在與否，則由溫度、壓力而定。如：在 900°C 下， Cu_2O 和 Cu 之平衡氧分壓為 1.49×10^{-9} atm，而 Cr_2O_3 和 Cr 的只有 1.6×10^{-22} atm，因此 Cr_2O_3 要比 Cu_2O 要來得穩定。

在一個三元的系統裡 (Ternary system)，不僅有氧，且有硫，這時除有氧化 (Oxidation)，還會有硫化

(Sulfidation)，甚至產生硫酸鹽類。一般 P_{S_2} 不僅是指純硫的蒸氣壓，硫化物的蒸氣壓亦包含在內，如： H_2S ， SO_2 ， SO_3 等，此些均可能導致金屬的硫化；同樣的在含 CO_2 或 H_2O 等氧化氣氣，亦可生成氧化現象。若均含有此些氣體，則可產生氧化、硫化，或甚至硫酸鹽。

圖 1 為鐵在 1000°K 下，隨氧氣分壓及硫蒸氣壓之不同，而有不同的腐蝕生成物，圖 2 為鎳的系統。在這兩個圖上某一點，即代表某一固定之氧氣和硫蒸氣的分壓，而可預測會生成何種較穩定的氧化物、硫化物或硫酸鹽。圖 2 中，鎳所生成的硫化鎳是一種熔點很低的化合物，因此在噴射引擎之 700°C 以上即成為液體。硫的平衡蒸氣壓可利用熱力學上之自由能算出， $\log P_{\text{S}_2} = \Delta G^\circ / 2.303 RT$ 。在 Cu_2S 和 CuS 系統中，於 800°K 下，硫的平衡蒸氣壓為，

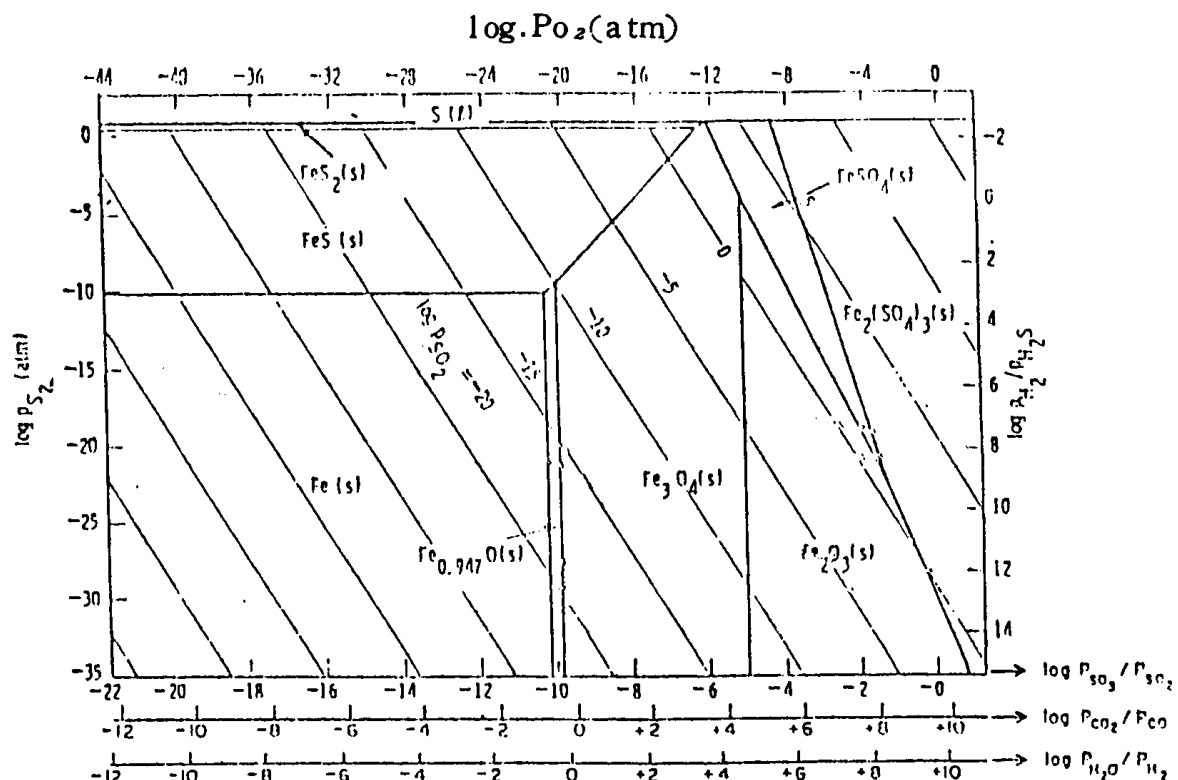


圖 1. Fe-S-O 系於 1000°K 下之平衡相圖

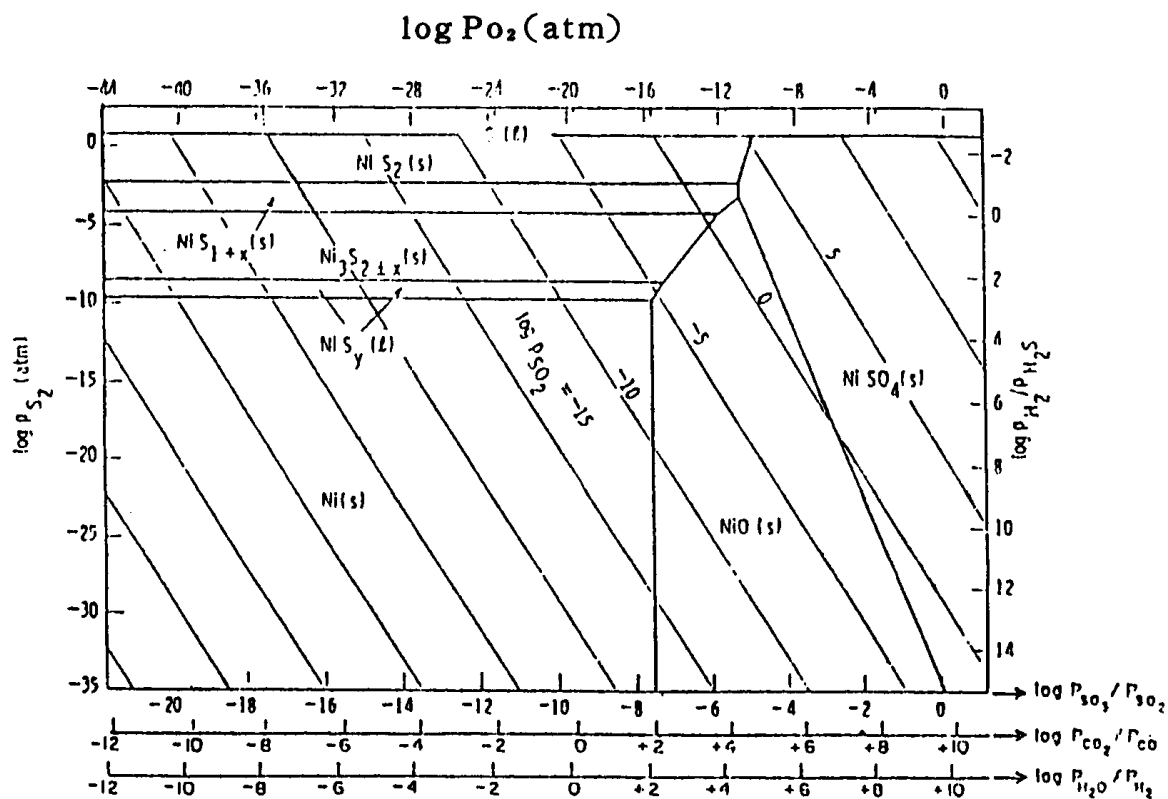


圖 2 Ni-S-O系於1000°K下之平衡相圖

$$\begin{aligned}
 &P_{S_2}(\text{CuS}-\text{Cu}_2\text{S}) \\
 &= \exp\left(\frac{-2000}{8.31 \times 800}\right) \\
 &= 4.94 \times 10^{-2} (\text{atm})
 \end{aligned}$$

因此硫蒸氣分壓高於 $4.94 \times 10^{-2} \text{ atm}$ 以上， Cu_2S 表面即開始生成 CuS 。

不銹鋼在含氧、硫的氣氛下，容易

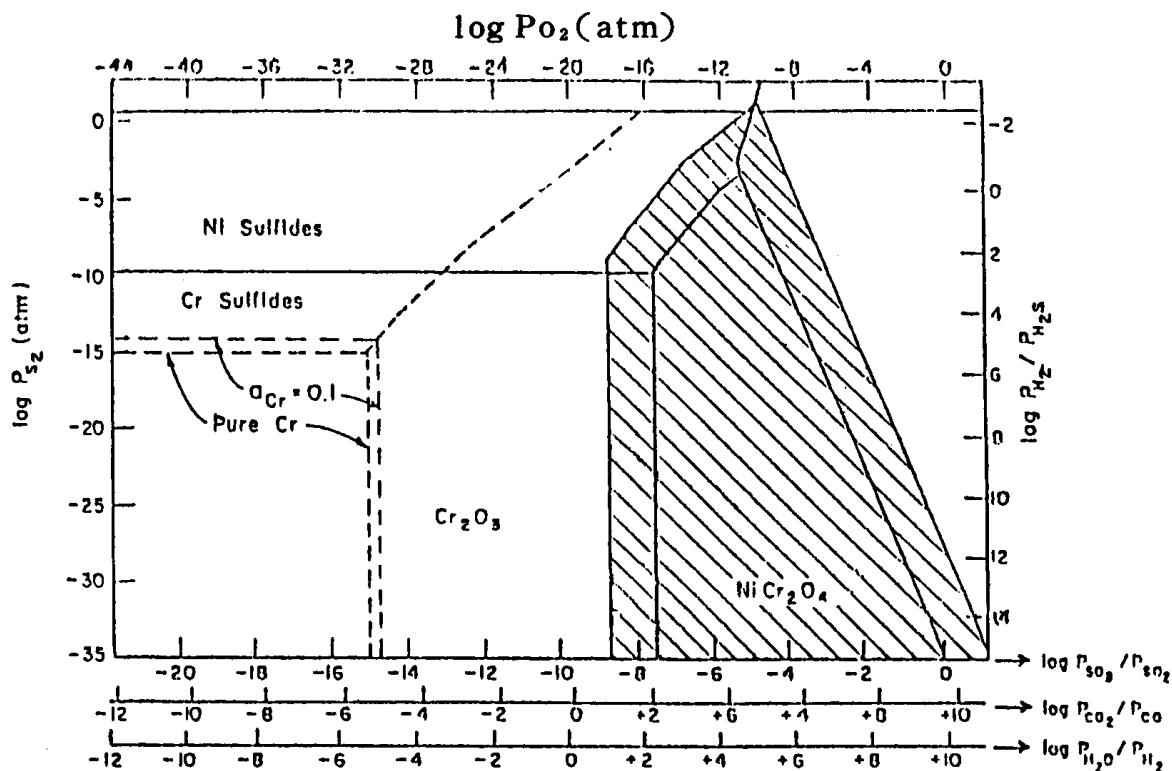
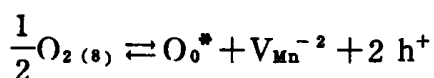


圖 3 Cr-Ni-S-O系於1000°K下之平衡相圖

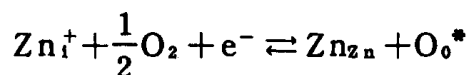
生成 NiCr_2O_4 的 spinel 相 (圖 3)，其具有相當程度的保護性，而 Al 和 Mn 亦會生成 AlMn_2O_4 ，雖然此兩種氧化物之保護性仍較 Cr_2O_3 或 Al_2O_3 稍差，但理論上以 Mn ， Al 取代 Ni ， Cr 似乎是可行之路。圖 1 ~ 3 的氧氣分壓可由 SO_3 和 SO_2 ， CO_2 和 CO ，或 H_2O 和 H_2 分壓的比值所決定，如： SO_3 和 SO_2 比值為 1 : 1 時，就相當於氧的分壓為 1 atm， H_2O 和 H_2 比值為 1 : 1 時，氧的分壓為 10^{-20} atm，因此系統內若不是純氧，由氣氣所含成份的比值，即可得氧的分壓。

正常狀況下，氧化物的成長主要是因其含有缺陷供傳送離子，如： MnO ， CuO ， NiO ， Cr_2O_3 ， Al_2O_3 ， FeO 等均有金屬的空位 (Vacancy of metal) 和正的孔洞 (Positive hole) 的缺陷，而形成 P - 型的半導體，這些缺陷是氧氣和金屬氧化物的結構作用以後生成的，如： Mn 以離子狀態離開，留下負二價的空位，而為了達成電中性，就會生成兩個正的孔洞，反應如下：



$$K = [\text{V}_{\text{Mn}}^{-2}] [h^+]^2 / \text{Po}_2^{1/2}$$

由上式可知，當氧分壓提高，生成的 $\text{V}_{\text{Mn}}^{-2}$ 也就增加，正的空孔亦增加， Mn^{+2} 離子擴散速率就提高，氧化就進行的愈快。但 ZnO 就不相同，其為一 n 型的半導體，缺陷是由 Zn 離子存於 Interstitial 位置上，和電子作用形成一般晶格位置 (Normal lattice site) 所致，



$$K^{-1} = [\text{Zn}_i^+] [e^-] \text{Po}_2^{1/2}$$

因此氧分壓提高，在 Interstitial 位置之 Zn 濃度變小，而鋅氧化膜的生長

是由在 Interstitial 的鋅的移動所造成，因此氧化膜生長變慢；另外 Zr ， Ti 的氧化物也是 n 型半導體。有一類的氧化物有極高的導電率且和氧分壓無關，此原因為電子上的缺陷遠超過離子的缺陷，如在 1000°C 下之 $\text{CuO}^{(4)}$ 。

氧化膜的生長方式主要有兩種：

- (1) 陽離子向外擴散和氧結合。此時為維持電中性，就有正孔洞 (Positive hole) 向裡面擴散。氧化物表面的氧分解成氧原子和擴散出來的陽離子作用生成氧化物，同時產生空位 (Vacancy) 和正孔洞 (Positive hole) 向內擴散，正孔洞會和金屬作用，而陽離子空位 (Cation vacancy) 可能沈積於銹皮、金屬 / 銹皮界面，或金屬底材內。
- (2) 陰離子向內擴散，即氧分子解離成氧原子後，取得電子，然後擴散穿過氧化物，而和金屬作用，生成氧化物。陰離子向內跑，就是帶負電的電子和陰離子空位亦向外擴散，而和氧分子或原子作用，此種為 n - 型半導體。

P 型半導體的缺陷結構 (Defect structure) 為陽離子的空位和正的孔洞，氧化膜是在氣體和氧化物界面生長；n 型半導體的缺陷結構為陰離子的空位和電子，其氧化膜是在氧化物和金屬界面生長。這兩種氧化膜的生長機構及最後剝落的情形和原因，可由實驗上分辨出。利用不會和金屬底材作用之 Marker，如：白金，焊於金屬上，若反應機構是陽離子向外擴散，則 Marker 會留於氧化物和金屬之間；如為陰離子向內擴散，則 Marker 會留於氧化膜表面。但 Tylecote⁽⁵⁾發現在純銅中，Marker 留在金屬和氧化物的界面，而在 99 % Cu - 1 % Al 合金，卻留在氧化物和氣體界面。此現象被認為與 Marker 存於氧化物中之原因相同，是由於鋁離

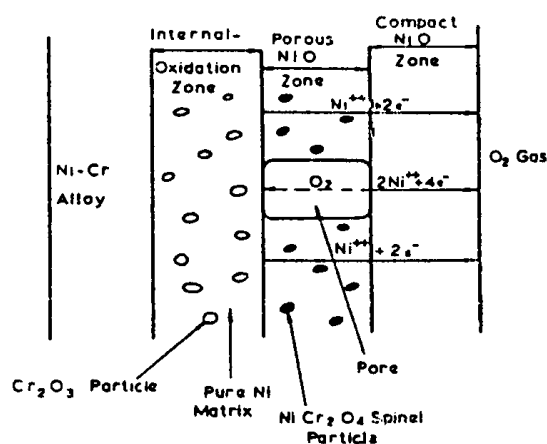
$$\text{MO} + \text{V}_{\text{M}}^{-2} + 2 \text{h}^+ \rightleftharpoons \text{M}^* + \frac{1}{2} \text{O}_{2(\text{s})}$$

A graph showing the relationship between Mass gain (Y-axis) and Time (X-axis). The curve starts at the origin and rises. A dashed line represents the 'Parabolic extrapolation of initial results'. The solid curve deviates from the dashed line at a point labeled 'Metal-scale separation begins'. The curve continues to rise, showing a sharp drop labeled 'Scale spalls', and then continues to rise again, labeled 'Recorded curve'.

圖 4 氧化動力學曲線圖 (4)

A schematic diagram of a three-layer oxide scale. The diagram is a rectangle divided into three horizontal layers. The top layer is labeled O_2 Gas above it and $NiO + NiCr_2O_4$ Spinel above it. The middle layer is labeled Cr_2O_3 to its right. The bottom layer is labeled $Ni-Cr$ Alloy to its right. Arrows point from the labels to the corresponding layers.

(a)



(b)

圖 5 Ni-Cr 合金的氧化示意圖

(a) Cr > 10 wt %

(b) $0 < \text{Cr} < 10 \text{ wt } \%$ ⁽⁴⁾

，所以NiO可繼續生長，而Cr量少，所以無法生成緻密的Cr₂O₃連續層，至於NiO不往內生長，是因氧氣分壓低，而Ni對氧的親和力又不如Cr，因此在

合金裡面往往會生成細小的 Cr_2O_3 。

Ni 在含 SO_2 , SO_3 , O_2 之氣氛下，其典型的腐蝕生成物，如圖 6 所示，一般金屬在此氣氛中，亦有類似的分佈圖。

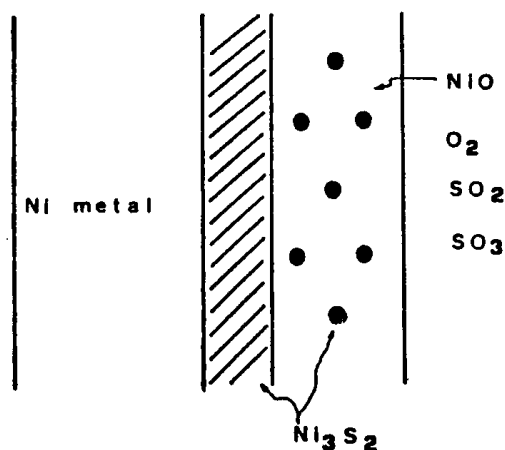


圖 6 Ni 在含 O_2 , SO_2 和 SO_3 氣氛下之腐蝕生成物分佈圖

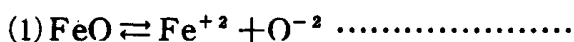
二、熱腐蝕 (Hot corrosion)

熱腐蝕之定義為：Attack of a metal by a thin fused salt film in the presence of a gaseous oxidant。一般於熔融鹽類中會含有陽離子，如：鹼或鹼土金屬離子 (Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , etc) 及腐蝕生成物的離子 (Fe^{+2} , Ni^{+2} , ...)，陰離子有 Cl^- , CN^- , SO_4^{-2} , CO_3^{-2} , NO_3^- , PxOy^{-2} , BxOy^{-2} , SixOy^{-2} , etc.，此類熔融鹽熔點低，如表 3，4 所示，因此些鹽類熔融後易和金屬或金屬氧化物作用，而加速金屬的腐蝕。

熱腐蝕和水溶液的腐蝕很類似，只是電解質分別為熔融鹽類和水，另外熱腐蝕的實驗必須以薄膜來測，以和實際腐蝕情形相同，若膜較厚，則氧的擴散就會有所不同，而在金屬上放薄的 Molten salt film，再裝各種測量電壓、電流等裝置，且於高溫狀態，所以

實驗不易進行。一般測試方法以(1)浸漬方式，測其重量損失，裝置如圖 7(a)所示，(2)電化學方法，測其極化曲線，說明腐蝕之難易程度，裝置如圖 7(b)所示。

水溶液和熔融鹽類最大不同是水溶液定一 PH 值，而熔融鹽類則考慮氧離子 (Oxygen anion) 的濃度，它和水溶液中的氫離子作用是一樣的，氧氣可跟電子作用生成陰離子 (Anion)，其作用就如同放一個電子在熔融鹽中，此時電位由氧離子濃度和氧的分壓來決定。氧離子對金屬在高溫腐蝕的關係，可以下式來說明，



Acidic corrosion

$$K_E = \frac{[\text{Fe}^{+2}][\text{O}^{-2}]}{(\text{FeO})} = \exp\left(\frac{-\Delta G_E^0}{RT}\right)$$

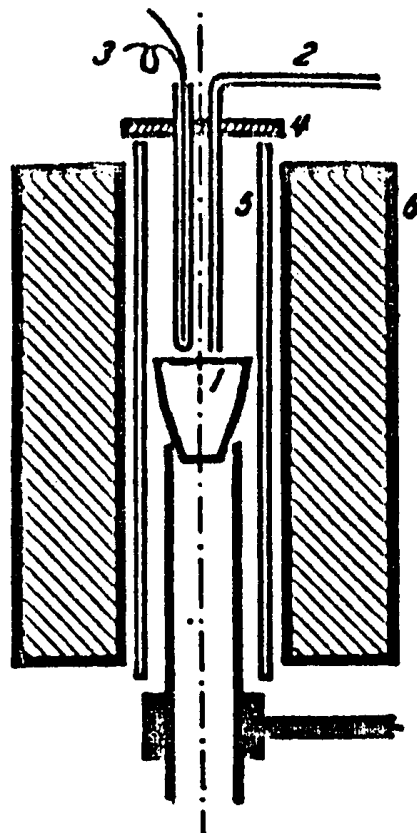


圖 7(a) 測試 V_2O_5 , Na_2SO_4 等熔融鹽對金屬腐蝕之裝置。1.裝試片之坩堝，2.氧氣管，3.熱電偶，4.石棉封口，5.保護管，6.管狀加熱爐。

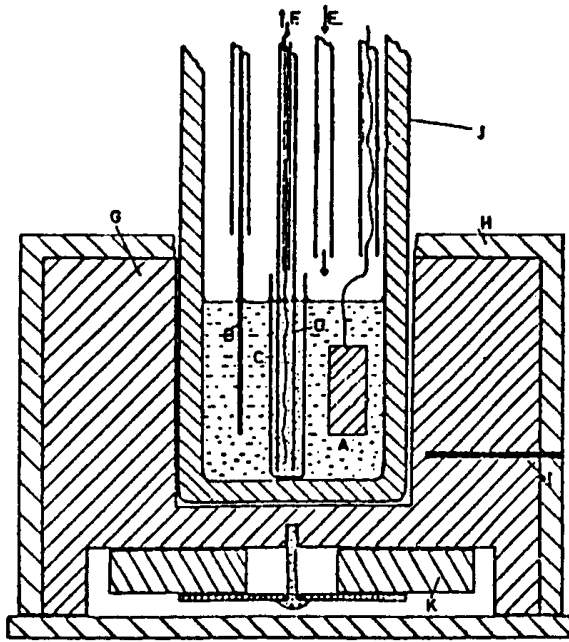
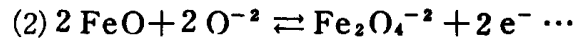


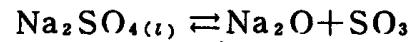
圖 7 (b) 在熔融鹽中，測試極化曲線之裝置。A 黃金電極，B 試片電極，C 氧化鋁坩堝，D 黃金參考電極，E 空氣注入管，F 供給 O_2-CO_2 至參考電極，G 不銹鋼爐體，H 絕熱裝置，I 熱電偶，J 氧化鋁坩堝，K 加熱器



Basic corrosion

氧離子濃度高，會產生鹼性腐蝕，濃度低為酸性腐蝕。這裡的腐蝕是熔融鹽會把金屬表面氧化膜熔解掉，在氧離子濃度高，叫鹼性 (Basicity)，氧離子濃度低時，叫酸性 (Acidity)，由上兩式可知在此兩種情況下，都會把鐵的氧化膜熔解掉，無法保護下層的金屬，而繼續進行腐蝕。

圖 8 為在一定溫度下，Ni 和 Na 金屬之 Basicity diagram⁽⁴⁾，這與水溶液的 PH-E 圖是一樣的，由圖上可知在何種情況下會有那種腐蝕生成物。



$$K = \frac{P_{SO_3} \cdot a_{Na_2O}}{a_{Na_2SO_4}}$$

$$a_{Na_2SO_4} = 1$$

$$\log P_{SO_3} + \log a_{Na_2O} = \log K$$

由上式可看出，以 $\log P_{SO_3}$ 和 $-\log a_{Na_2O}$ 來定它的鹼性度是一樣的。Ni 在鹼性的反應 (Basic dissolution) 為，

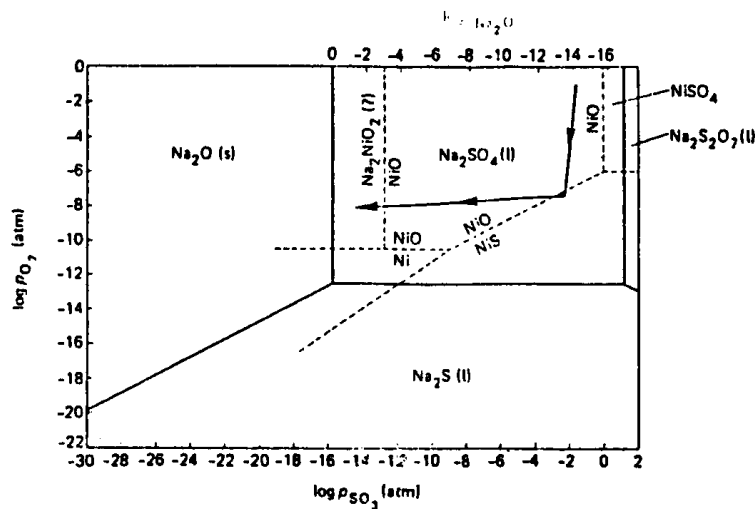


圖 8 Ni-S-O 和 Na-S-O 系統之平衡相圖及 Ni 在熱腐蝕之反應路徑⁽⁴⁾

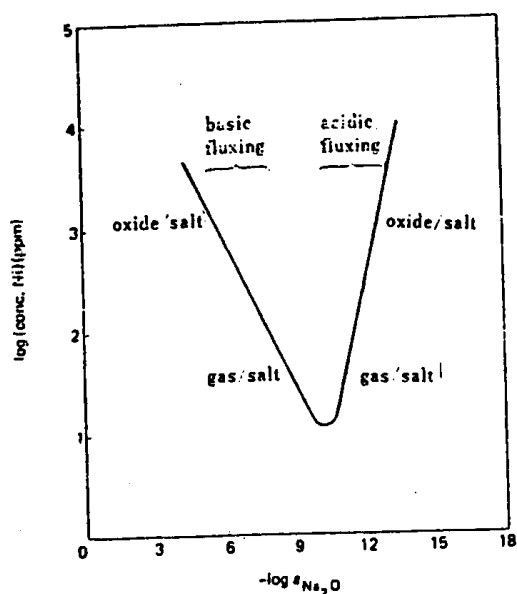
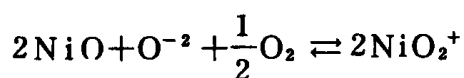


圖 9 NiO 在 1200°K 下之熔融 Na₂SO₄ 的熔解度曲線⁽⁴⁾



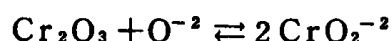
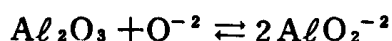
酸性反應 (Acidic dissolution) 為，



圖 9 為 Ni²⁺ 濃度和鹼性度之關係。此乃將 Ni 放入盛有 Na₂SO₄ 的鉗鍋中，於不同鹼性度下，測 Ni²⁺ 濃度，在強鹼和強酸下，於 Ni²⁺ 濃度較高，也就是 Ni 被腐蝕得較嚴重，於近中性處最不易被腐蝕，此與水溶液者相似。而對被認為保護性甚佳之 Al₂O₃ 和 Cr₂O₃，其在 Na₂SO₄ 熔融鹽之情形，則如圖 10 所示⁽⁶⁾，其酸性反應分別為，



鹼性反應，則為，



當於鹽類和大氣界面之氧含量很高時，上面兩式會向左邊反應，再度析出 Al₂O₃ 或 Cr₂O₃。另外在 1200°K 下，於氧和硫含量高之 Na₂SO₄ 鹽類中，Al₂O₃ 亦會反應生成 NaAlO₂，

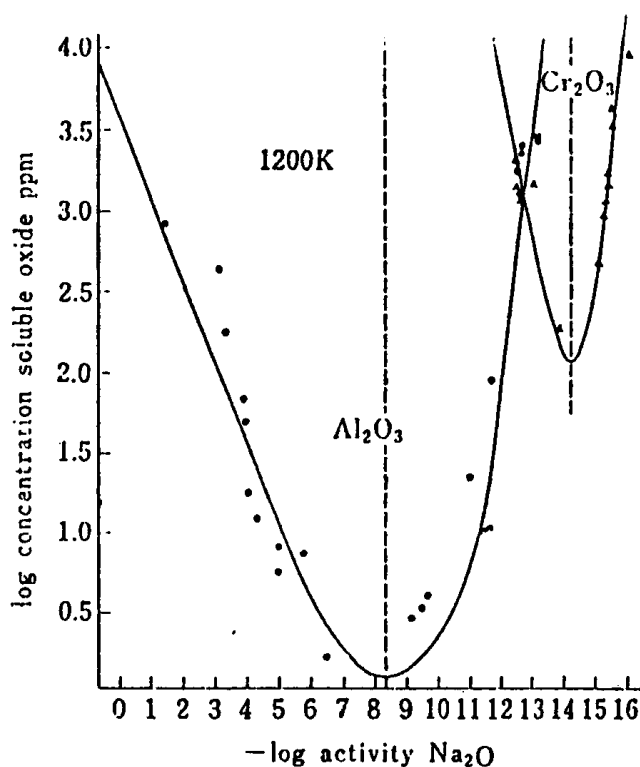
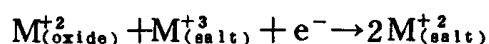


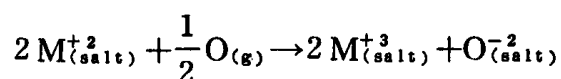
圖 10 Al₂O₃ 和 Cr₂O₃ 在 1200°K 之熔融 Na₂SO₄ 鹽中之熔解度曲線⁽⁴⁾

Al₂(SO₄)₃，而不具保護性；同樣的 Cr₂O₃ 亦會生成 Cr₂(SO₄)₃。若生成硫化物，如：Al₂S₃，CrS，其比 FeS 和 NiS 等仍較具保護性，因缺陷密度較低。

利用電化學和化學反應的模式來解釋熔融鹽類的腐蝕，其反應機構如圖 11 所示⁽⁷⁾。陰極反應（氧化物／鹽類界面）為，



陽極反應（鹽類／氣體界面）為，



四、高溫材料的發展

近年來許多用在高溫的材料逐漸被開發出來，尤其是針對特殊環境者，不過主要還是在生成 Cr₂O₃ 或 Al₂O₃ 來保護底材，並增強其機械性質和避免其

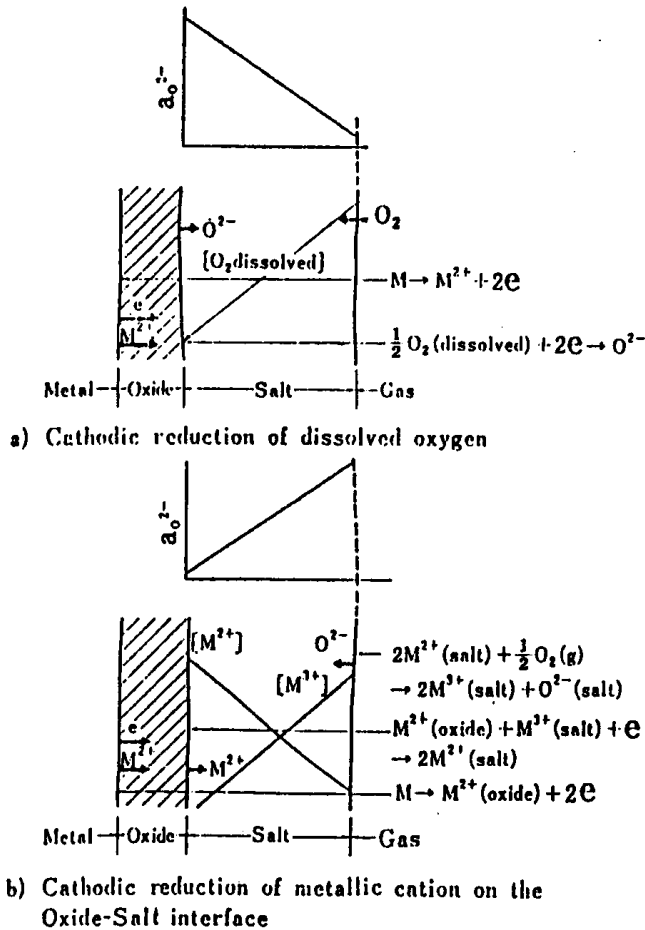


圖11 在熔融鹽中，以電化學和化學的模式表示熱腐蝕之陰極還元反應過程⁽⁷⁾

揮發，及能繼續生成此種氧化物連續層為着眼點。而使用鍍陶瓷材料更是蓬勃的在發展，另外cladding的方式亦逐漸被採用，如鍋爐內使用之鋼材一般為含 $2\frac{1}{4}\text{Cr}$ 的低合金鋼，現在使用

coextrusion生產外層為不銹鋼，而內層為低合金鋼或碳鋼的鋼管，因不銹鋼對煤、油燃燒氣氛之抗蝕性佳，而低合金鋼和碳鋼抗應力腐蝕較不銹鋼為佳。

五、結論：

高溫腐蝕的問題頗為複雜，主要為合金之成份組成的不同即有不同的腐蝕行為，更加上氣氛或溫度的不同，而影響其抗蝕性，另外熱腐蝕的熔融鹽更因

不易得知其化學性質之變化，迄今對其侵蝕機構仍不是十分清楚。

世界既有能源逐漸在耗盡，未來高效率之產生能量的裝置將朝向高溫發展，如：巨型的鍋爐在二十年前各方面的設計即已成熟，而其效率要高，過熱裝置(Superheater)的溫度必須提高，但不能超過 1100°F ，否則會生成缺陷多之吳斯田鐵(Wüstite)，這就是鍋爐的效率受限於材料的特性。煤和油均含有硫，而硫是最易造成高溫腐蝕，因此在引擎或反應器中，有時需加添加劑，以抓住硫，或在金屬中添加合金或鍍上一層氧化物，以抵硫的侵蝕。

參考資料

1. G. Y. Lai; *Journal of Metals*, July (1985) 14.
2. 魏豐義; *防蝕工程*, 1, 10 (1987) 1
3. O. kubaschewski and C. B. Alcock; "Metallurgical Thermochemistry", Pergamon Press Ltd., (1979)
4. N. Birks and G. H. Meier; "Introduction to High Temperature Oxidation of Metals", Edward Arnold Ltd., (1983)
5. R. F. Tylecote and I. E. Mitchell; *J. Iron Steel Inst. (London)*, 195(1960), 445
6. 新居和嘉; "金屬材料の高温酸化と高温腐食", 丸善株式會社, (1982) 108
7. M. Kawakami, K. S. Goto, R. A. Rapp and F. Kajiya; *鐵と鋼* 65, 7(1979)89.