

新發展於燃煤蒸汽機用之奧斯田不銹鋼

張耀南*譯

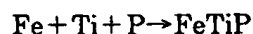
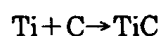
許多國家有興趣建立高級燃煤蒸汽循環系統，其過熱器 (Superheater) / 再熱器 (Reheater) 鍋爐管的蒸汽溫度和壓力都比傳統的系統更高，以致需要較高的抗潛變強度 (Creep Strength)。譬如在 700°C (1292°F)，此用途需要 100 Mpa (14.5 ksi) 之抗潛變強度以得到 10⁵ 小時之破斷壽命 (Rupture life-Time)，而 316 不銹鋼祇能承受 40 Mpa (5.8 ksi)。

在橡樹嶺國家實驗室 (Oak Ridge National Laboratory) (ORNL) 所發展的新抗潛變鋼是近年來為改進空穴脹疵 (Void Swelling) 和抗晶界 He 脆性之合金 [Fe-14Cr-16Ni-2.5Mo-2Mn 基 (單位是 wt%)] 的延伸。由於控制析出顯示出對抗潛變和對抗輻射一樣重要，因此延伸至抗高溫潛變的用途引人注目。在反應器放射中，細而穩定的 MC 型碳化物和細的 FeTiP 粒子在基地 (Matrix) 捕捉 He，使其在界面成為很細的氣泡，並束縛 (Pinning) 差排 (Dislocation) 防止爬登 (Climb)，以提供空穴脹疵。在高溫潛變中，當差排由於應力而爬登時，這種析出物將會有類似的束縛效應。

控制放射過程中晶界析出物所產生的脆性一延性破斷行為之改變亦在高溫潛變中會發生。

一些簡化的原理用來設計添加少量新的溶質之 Fe-14Cr-16Ni-2.5Mo-2Mn (以後簡稱 HT-UPS 14Cr-16Ni) 鋼，以產生抗高溫潛變，合金元素可根據他們所具有之相關相的反應之效應來分類，共有四種合金效應：

第一種合金效應是十分明顯的反應物效應：



這些代表最老舊的觀念，即以添加合金元素，直接在鋼中產生特定的析出相。鈦刻意添加形成富 Ti 之 MC 型碳化物。雖然理論上反應形成

* 中鋼公司鋼鋁研究發展處

TiC，但是有人用分析式電子顯微鏡 (AEM) 研究微細 (直徑 < 10nm) MC 粒子，顯示有足夠的 Cr 或 Mo。P 亦刻意添加，與 Fe 和 Ti 反應形成 FeTiP 相的細針狀物。

第二種效應 (催化劑效應) 較微小，但很重要，因它描述合金元素與其他元素之反應有間接效應：

$2\text{Fe} + \text{Mo} \rightarrow \text{Fe}_2\text{Mo}$ 拉弗氏相 (Laves Phase)，此可被 Si、Nb 催化

$\text{Ti} + \text{Fe} + \text{P} \rightarrow \text{TiFeP}$ ，被 V 催化

$\text{M} + \text{C} \rightarrow \text{MC}$ (M=Ti、V、Nb)，被 B、P 催化

$\text{Fe} + \text{Cr} \rightarrow \text{FeCr}$ (σ 相)，被 Ti 催化

消除一個不需要之相，傳統的方法是剝奪一種或兩種反應物。但是欲防止拉弗氏相形成，譬如若祇單純地移掉 Mo，將使鋼更易產生再結晶 (Recrystallization)，嚴重影響富 Ti 之 MC 形成。雖然拉弗氏相的形成隨鋼中 Si 含量而增大，但此相中的 Si 含量十分穩定，此行為顯示 Si 在形成拉弗氏相中擔任催化的角色。Nb 在拉弗氏相形成中有很強的類似效應，Ti 則能強烈地促進 σ 相形成，B 和 P 可促進 MC 形成，V 對 FeTiP 的形成有特別的促進作用。所以 Si 應降低，且 Ti 和 Nb 含量宜謹慎控制以使金屬間 (Intermetallic) σ 和拉弗氏相的形成降至最低，B、P 和 V 的添加則是希望同時改進 MC 和 FeTiP 之形成。

第三種效應 (抑制劑效應) 也十分微小，主要是由於觀察到有熱時效 (Thermal Aging) 時，一些特定的相在中子放射 (Neutron Irradiation) 時消失了，此效應可說成是一些元素阻礙或封鎖其他元素的反應，如

$2\text{Fe} + \text{Mo} \rightarrow \text{Fe}_2\text{Mo}$ (拉弗氏相)，被 B、C 阻礙

$\text{Fe} + \text{Cr} \rightarrow \text{FeCr}$ (σ 相)，被 C 阻礙

相的形成過程中，一種元素的空乏將在前進

中之界面前的基地內產生溶質 (Solute) 的富集。如果擴散不能移開這些溶質的富集，或是不可溶的元素主動地聚集於界面而不遠離界面，則正反應之動力將最易被阻礙，可說成是反應的活化障壁提高。

高純度 (無碳) 奧斯田合金在時效時，拉弗氏相和 σ 相的加速形成和鋼中正常相的系列 (碳化物先，爾後是金屬間物) 相同，都說明了 C 抑制金屬間相的形成。加 B 降低拉弗氏相形成說明了類似的效應。C 和 B 被認為是抑制了金屬間相形成，所以含量比 316 鋼正常的含量更多。

最後要提的是在複雜的多相系統中，一些相反應將和其他具有共同元素的反應競爭，如 Ti 的 TiC 反應和 FeTiP 反應之明顯競爭。此種研究的著眼點在於含 MC 和 FeTiP 析出物的微組織，以致需降低這種干涉效應。富 Ti MC 的形成過程中，V 和 Nb 之合成效應對降低這種干涉效應是很重要的。混合添加 V 和 Nb 使 MC 粒子的成核 (Nucleation) 細化，而組成的分析顯示在 MC 相中有 V 或 Nb 與 Ti 結合物的強烈富集。另外，X 光能量色散分光分析 (EDS) 顯示磷化物並無 V 或 Nb 富集。

HT-UPS 14Cr-16Ni 奧斯田不銹鋼所選擇

的成份範圍如表所示，此範圍包含燃燒工程 (Combustion Engineering，簡稱 CEO-3) 和 AMAX (簡稱 AX5-8) 所煉的八爐鋼材。

HT-UPS 14Cr-16Ni 鋼的第一次潛變 (Creep) 測試顯示其在 700°C (1292°F) 和 170 MPa (24.7 ksi) 比一些鋼鐵或合金等參考材料有更優之抗潛變破斷 (Creep Rupture) 性能 (圖 1)。所有在 ORNL 測試之材料都在原有狀態 (Asreceived) 或軋機退火 (Mill-anneal) 狀態 [固溶化退火 (Solution Anneal) 加 5~10% 的暖變形 (Warm Deformation) 或冷變形 (Cold Deformation)]。ORNL 所發展之 HT-UPS 鋼所具有的抗破斷性能為 316 不銹鋼的 400~1000 倍、祇用 Ti 改良之 Fe-14Cr-16Ni-2.5 Mo-2Mn (熔融 PCA) 合金的 16~60 倍、用 Ti 和 Nb 改良之 17-14 CuMo 合金的 4~11 倍。

圖 2 顯示 HT-UPS 鋼在 700°C (1292°F) 有比其它鋼材較佳之抗潛變強度，在 650°C (1202°F) 則比其他鋼材甚強。事實上，從焊接觀點這種在軋機退火所獲得的強度代表比其他必須要有熱機 (Thermomechanical) 前處理之材料具有此額外的優點。但是 HT-UPS 鋼熱機前處理對潛變破斷強度之選擇的影響還沒完全探討過。

合金組成 (Fe 平衡), (wt%)

Alloy type	Cr	Ni	Mn	Mo	Ti	Nb	V	C	P	B	Si	Other
Commercial												
316 SS	16	13	2	2.5				0.04-0.06			0.4-1	
321 SS	17	11	1.5		0.39			0.06			0.4	
17-14CuMo	16.3	14	0.8	2.0	0.2	0.45	0.07	0.1			1	3Cu
Fusion PCA	14	16.2	1.8	2.3	0.24			0.05	0.01		0.4	
DIN 1.4970	15	15	1.5	1.2	0.5			0.1		0.005	0.4	
Essete 1250	15.5	10	6	1.0		1	0.25	0.1		0.006	0.4-0.6	
Tempaloy -A1	18	11	1.6		0.1	0.15		0.09			0.5	
Tempaloy-A2	18	14	1.5	1.5	0.16	0.23		0.09		0.003	0.05	
HT-UPS 14Cr-16Ni Steels												
CEO-3, AX5-8	14-16	16	2	2.5	0.3	0.1	0.1-0.5	0.08	0.02-0.07	0.005-0.007	0.1-0.4	0-2Cu
Tempaloy is a registered trademark of NKK.												

新發展於燃煤蒸汽機用之奧斯田不銹鋼

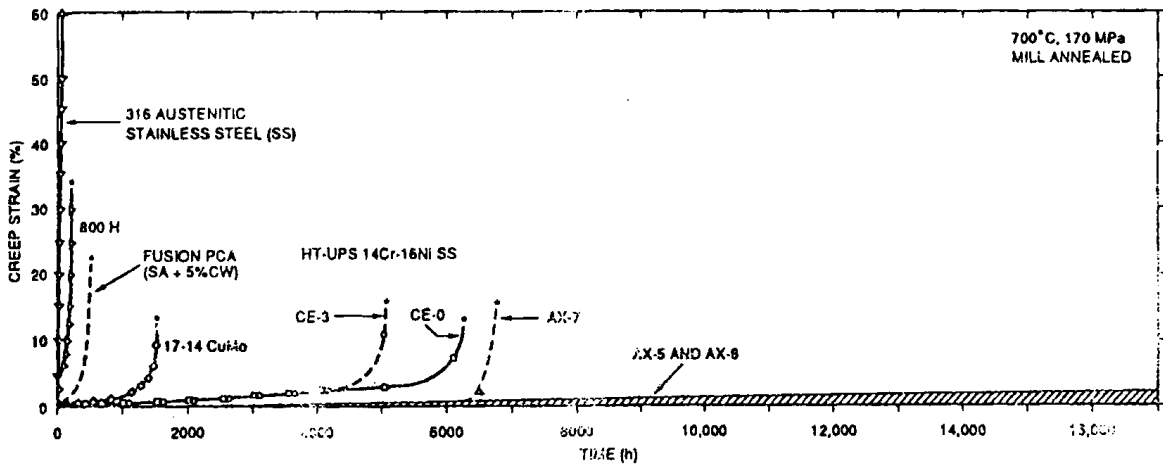


圖 1 不同 Fe-Cr-Ni 鋼和合金在 700°C、170 MPa 軋機退火狀態試驗之潛變應變 (Strain) 對時間之關係 (星號表破斷, 而 AX-5 和 AX-8 之試驗則持續一數據來自 R.W.Swindeman 和 P.J. Maziasz (ORNL))。

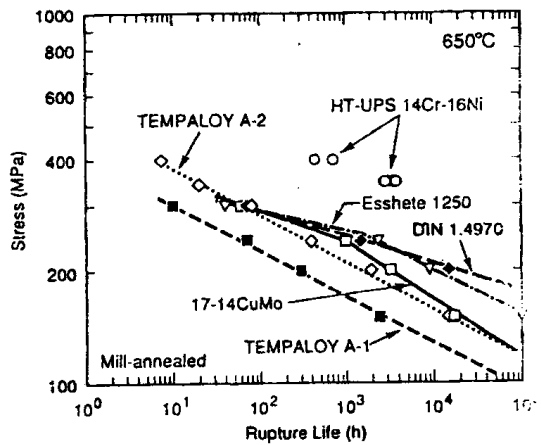
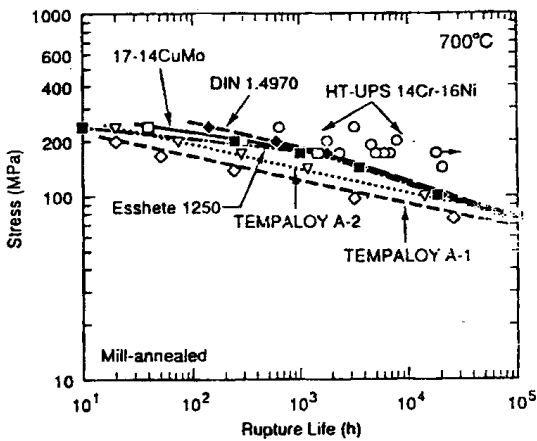


圖 2 不同高強度鋼在 700°C 和 650°C 試驗之潛變破斷壽命對外加應力 (Applied Stress) 的關係 (數據來自 JOM, 1989, P20, DIN 1.4970 合金在冷加工狀態, 其他在軋機退火狀態)。

冷加工的固溶退火溫度在使用上也需要, 則增加若最佳 (Cold Work) 量將具有特殊的好處。

抗潛變強度比 17-14 CuMo 的有所改進, 即滿足此新鋼種當初設計的準則。因 HT-UP 鋼在 700°C 之抗潛變破斷強度為 316 不銹鋼之兩倍以上 [且在 700~760°C (1292~1400°F)] , 此強度和 Inconel 617 相當, 所以它在蒸汽鍋爐管以外高溫上的用途是引人注目的。

(摘錄自 P.J. Maziasz "Developing an Austenitic Stainless Steel for Improved Performance in Advanced Fossil Power Facilities", Journal of Metals, 41 (7), 14 (1989), JOM 同意發表。)

(本文譯自 DOE Newsletter: Materials Components in Fossil Energy Applications, Qct.1, 1990)