

ASTM腐蝕速率量測方法於高溫腐蝕之應用

周士琦，王朝正

The Measurement of the ASTM Corrosion Rate for the Application of High Temperature Corrosion

Shih-Chi Chou and Charu-Jeng Wang

摘要

選用低碳鋼，依ASTM G54規定，於800℃分別進行2、4和8小時單純靜態氧化試驗。藉由系統化實驗程序，以金相檢驗法為參考標準，探討ASTM G1規定之機械、電解和化學清洗等三種去除氧化皮膜方法，於腐蝕速率評估之正確性。其結果顯示，以化學清洗法最準確，電解法次之，而機械法效果最差。

關鍵詞：低碳鋼、單純靜態氧化、去除氧化皮膜、腐蝕速率。

ABSTRACT

To investigate the accuracy of the calculation of corrosion rate for high-temperature oxidation, three cleaning methods of ASTM G1 were evaluated. Based on ASTM G54, low carbon steel was statically oxidized at 800°C, for 2, 4 and 8 hrs, respectively. The corrosion rates were calculated by weight changes per unit area obtained by mechanical cleaning, by electrolytic cleaning and by chemical cleaning. The error percentage ratios were compared with the standard reference obtained by OM examination. The results show that descaling by chemical cleaning has the best accuracy, while mechanical cleaning produces the worst results.

Key words: Low carbon steel, Simple static oxidation, Descale, Corrosion rate.

一、前言

陽光、空氣和水是人類生命的三要素。陽光（溫度、熱）提供了各式反應所需要的活化能量，空氣提供了氧，水則以其流動性形成電解質作為物質與電荷傳遞之介質。經由氧化所釋放出

的能量，使人類得以進行各項的活動。相同地，此三要素也提供了人類生活環境中所有物質，尤其是具自由電子的金屬材料，發生腐蝕之機會，造成材料逐漸脫離原始設計之尺寸、性質，嚴重者將造成不可預期之危害。因此，對於材料腐蝕行為特性及腐蝕速率之評估，便成為工程師們在

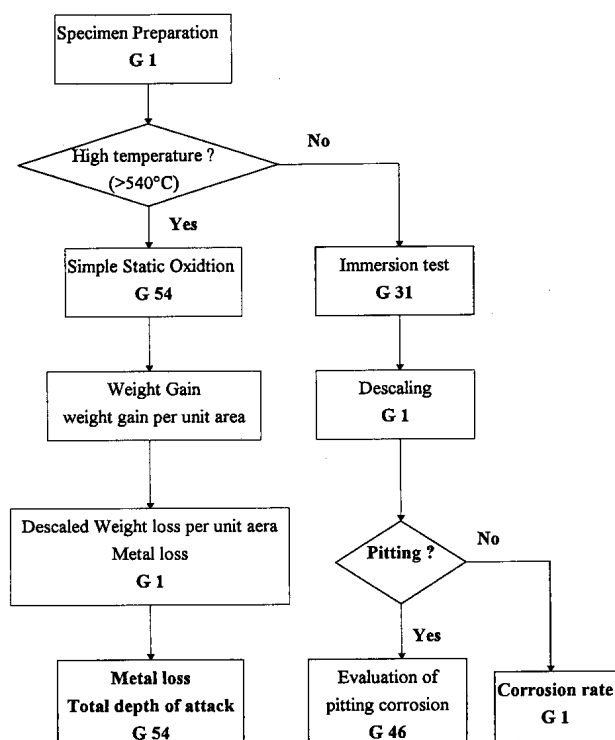


圖 1 ASTM於腐蝕之通用試驗方法及其流程與使用標準。粗體字為該程序試驗所必要報告之結果

Fig. 1 The ASTM standards and procedures for general corrosion tests. The boldfaced keywords indicate the necessary results to be reported.

選用材料時必需考慮的因素。

由於材料的腐蝕行為與其存在環境有密切的關係，在不同的腐蝕環境之下可能會展現不同的腐蝕特性，因此對於材料腐蝕行為特性之評估，一般均必需依照特定之標準程序，藉此獲得有意義並俱比較性的資料。美國材料測試學會(ASTM)由美國防蝕學會(NACE)技術資料所改編所成的G類系列標準，便是工業界所共同接受與實用的測試方法。在ASTM G類的測試標準中，屬於非特定材料或用途之通用測試方法，為常溫用途之G31[浸泡試驗]⁽¹⁾與高溫用途之G54[單純靜態氧化試驗]⁽²⁾，此外G1[試片準備、清洗和腐蝕速率計算]⁽³⁾則為量測腐蝕損失時所必要實施之手段，其關係如圖1所示。如圖

所見，對於常溫G31浸泡試驗後之腐蝕形態，若為局部之孔蝕形式，則再依G46[試片孔蝕之檢驗和估算]⁽⁴⁾進行評估，若為均勻的腐蝕，則以G1進行腐蝕速率之評估。

ASTM G1之應用領域包含了腐蝕試驗前試片準備及試驗後腐蝕產物之清除與腐蝕損傷，尤其是腐蝕速率之評估。因此ASTM G1扮演著ASTM系列腐蝕試驗標準最基礎之程序。對於腐蝕產物之去除方式，ASTM G1揭示了電解法(electrolytic)、化學法(chemical)和機械法(mechanical)三種方式來清除腐蝕產物。其中，以毛刷清除之機械法最為簡便，但僅適用於腐蝕產物量很大之情況。當腐蝕產物去除後，再經式(1)之計算即可獲得該材料當次腐蝕試驗之腐蝕速率。經由腐蝕速率之數據，工程師們得以依循此資料對該材料之應用構件進行壽命預測或評估。

$$\text{腐蝕速率(mm/y)} = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (1)$$

其中 K：腐蝕速率常數為 8.67×10^4

W：重量損失(g)

A：試片原表面積(cm^2)

T：實驗時間(hr)

D：試片密度(g/cm^3)

對於高溫靜態腐蝕特性，ASTM G54提供了另一種適用於 540°C 以上之評估方式。然而由於高溫腐蝕反應之機制，經常由原子之擴散反應所主導⁽⁵⁾，而非式(1)所揭示之界面線性反應。此外，在高溫腐蝕環境中可能會物質揮發、皮膜剝落、內部侵蝕(internal attack)或多種反應同時發生之情況。因此ASTM G54採用單位面積重量變化(weight change per unit area)和侵蝕總深度(total depth of attack)兩項指標進行評估，式(2)為單位面積重量變化之計算式。由於腐蝕產物可能在高溫反應中揮發或於冷卻時剝落，因此式(2)中的 W_f 得為試片經由ASTM G1規定方式去除腐蝕產物後之重量，此時C值為去除銹皮之後，

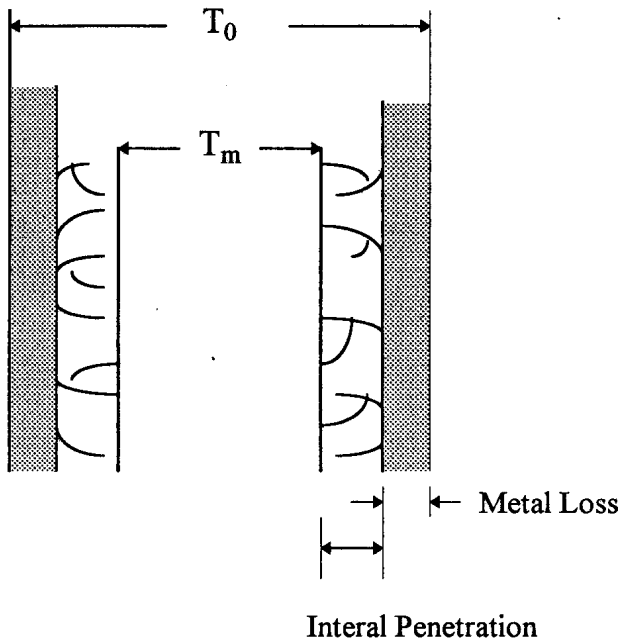


圖 2 ASTM G545-84決定靜態氧化侵蝕總深度之示意圖

Fig. 2 Schematic diagram showing the method to determine the total depth of attack for static oxidation testing as recommended by ASTM G 54-84.

單位面積重量損失(descaled weight loss per unit area)。圖 2 為 ASTM G54 對於高溫氧化後試片量測之示意圖，式(3)為侵蝕總深度之計算方法，而圖 2 中的金屬損失值(metal loss)，得經由 ASTM G1 所推薦之方式，於去除高溫皮膜後經換算而獲得。基本上，ASTM 54 並未提供高溫腐蝕速率之評估方式，而是以單位面積重量變化代表特定時間之反應總量，以侵蝕總深度代表該材料延展性及韌性。另一方面，如圖 2 所見，欲獲得侵蝕總深度，除了以正確的金相法獲得試片存留完整金屬之厚度 T_m 外，還必須先有正確之試片初始厚度資料， T_0 。一般而言，以手工製作之砂紙磨光試片，整個試片兩面之平行誤差常達百微米以上，而二、三十微米則為人力可及之極限，精確的試片其平行度因而成為準備試片時最困難之步驟。故為獲得金相檢驗之基準面，就需

以精密磨床研磨試片，固定其平行度。因此如 Lai 對工程合金高溫腐蝕之回顧文獻⁽⁹⁾中所見，部份學者僅以重量變化表示，或是利用 G1 清除腐蝕產物後的重量損失依密度換算為金屬損失，甚至亦有部份研究人員為了進行壽命評估而再利用式(1)計算其線性腐蝕速率。

$$C = \frac{W_F - W_0}{A} \quad (2)$$

其中 C：單位面積之重量變化(g/m²)

W_F：反應後重量(g)

W₀：原始重量(g)

A：試片原表面積(m²)

$$D = \frac{T_0 - T_m}{2} \quad (3)$$

其中 D：侵蝕總深度(mm)

T₀：試片原始厚度或直徑(mm)

T_m：試片存留完整金屬之厚度(mm)

對於高溫腐蝕反應，如前所述，基本上為符合擴散主導之拋物線率。然而多種元素存在時，其擴散反應機制可能同時或先後發生，因此無法由總體重量變化之動力學資料(kinetics data)經簡單地解析後，獲得壽命評估之腐蝕資料。另一方面，對於高溫化學腐蝕與常溫電化學反應所獲得的腐蝕產物，不僅在形式與形態上有所不同，並且腐蝕產物間，以及產物與基材間之鍵結強度也有很大的差異。因此 ASTM G1 中所建議三種去除腐蝕產物之方式，能否適用於高溫腐蝕試驗，也將是個必要檢討之課題。

基於以上之因素，本研究選用低碳鋼為實驗素材，並依 ASTM G54 所規定方式於 800°C 進行單純靜態氧化試驗，利用三個氧化時間評估線性腐蝕速率之誤差度；同時藉由系統化的實驗探討 ASTM G1 中電解法、化學清洗法及機械法於去除高溫氧化皮膜之可行性及其誤差度。藉此，提供腐蝕研究者在評估材料腐蝕特性時，腐蝕皮膜去除方法選用上之參考。

二、實驗方法

(一)試片準備

本研究實驗材料為低碳鋼S15C，其化學成分(wt%)為碳：0.15，矽：0.03，錳：0.74，磷：0.008，硫：0.033，試片先經冷軋成片狀後置於930°C加熱5~10分鐘，然後空冷做正常化處理。試片之平行度以磨床處理，藉此控制試片之平行度於5 μ m的範圍內，而試片厚度之截面均以砂紙研磨至220號，試片大小約為22.5mm $\times$ 13.5mm $\times$ 2.7mm；各試片於加工後，再以丙酮清洗後烘乾並以精度為0.01mg之精密天平稱重。

(二)單純靜態氧化試驗

依ASTM G54中1.2節所規定之方式實施，將低碳鋼於800°C分別進行2、4和8小時單純靜態氧化試驗，其試驗及分析流程如圖3所示。

(三)腐蝕皮膜之去除

1. 機械法

依ASTM G1中6.4節所規定之方式實施，以軟毛刷子將試片表面鬆散氧化皮膜去除，並置於超音波振盪器中分別以清水、丙酮各清洗5分鐘，烘乾後稱重。

2. 電解法

依ASTM G1中6.3節所規定之方式實施，電解溶液之成分及電極等配置，依ASTM G1中A2規定之方式實施。於電解前先以機械法將鬆散的氧化皮膜去除，電解溫度為25°C，電解時間為40分鐘，電流密度大小為150 A/cm²，陽極為石墨棒，陰極為高溫氧化後之試片，電解液之配製為：NaOH 75g、Na₂SO₄ 25g、Na₂CO₃ 75g均勻混合之後，加水成1000mL之電解液。

本研究除依ASTM G1標準規定電解時間40分鐘，另採用電解至80分鐘，藉此評估加長電解

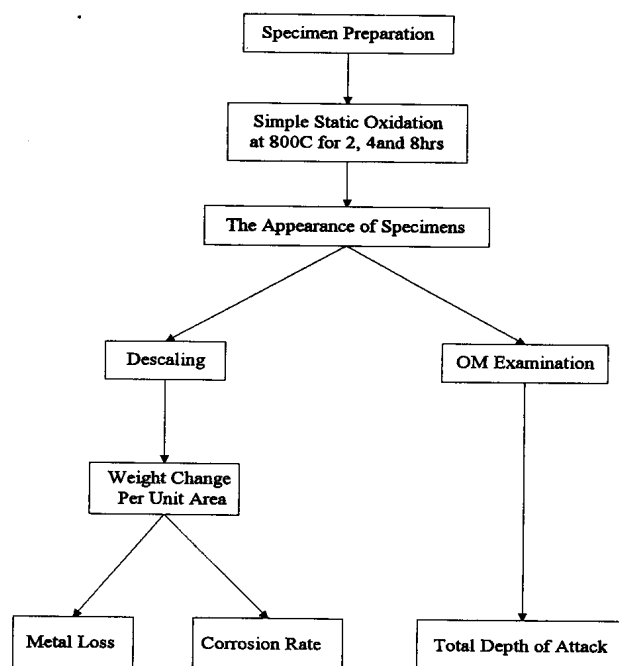


圖3 低碳鋼800°C靜態空氣氧化之實驗及結果評估流程圖

Fig. 3 The flowchart of experimental procedures of this study.

時間後，腐蝕皮膜之去除狀況。

3. 化學清洗法

化學清洗法依ASTM G1中6.2節規定之方式實施。化學清洗液依ASTM G1中A1規定之配製，其化學清洗液之成分為500mL HCl，3.5g hexamethylene tetramine加水配成1000mL之溶液，清洗溫度為25°C，清洗時間為10分鐘。

由於ASTM G1之A1規定中建議，若以上述化學清洗液去除氧化皮膜，必要時得增加其清洗之時間。為探討在規定之清洗時間之內是否能完全將高溫氧化皮膜去除，本研究另增長清洗時間至20分鐘，並於每清洗1分鐘之後立即將試片自清洗液中取出，以清水清洗後烘乾對試片稱重記錄，再依ASTM G1中6.1節規定之方式，決定試片反應後的重量損失。

4. 金相檢驗法

先將氧化後之試片垂直鑲埋後，置於金相顯

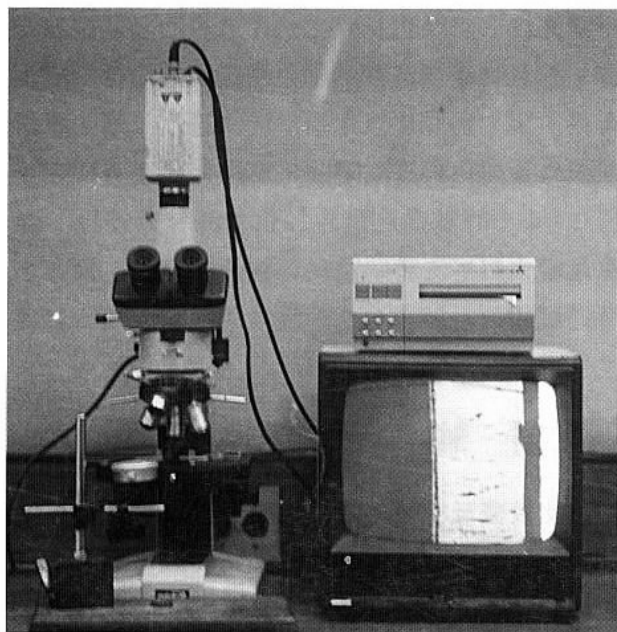


圖 4 金相檢驗設備之配置圖

Fig. 4 The equipment used for OM examination.

微鏡之載台上，其實驗之配置如圖 4 所示，再移動指針式量表（型號 Teclook TM-1205，精度 $1\mu\text{m}$ ）之探針至與載台邊緣相接觸，反覆移動載台，直到試片之侵蝕邊界與螢幕之中心線重合之後，將量錶歸零；緩緩移動載台使試片另一邊之侵蝕邊界與中心線重合，此時量錶讀數即為試片未受侵蝕之厚度。每個試片未受侵蝕之厚度值取三次量測之平均值。

三、實驗結果

(一) 高溫氧化試驗

表一是低碳鋼試片於 800°C 分別進行 2、4 和 8 小時靜態空氣高溫氧化後，依式(2)計算所得之單位面積重量變化，其數據均為兩次實驗結果之平均值。如表一所見，隨時間之增長，試片重量變化也隨之增加，且增加量與時間之平方根成正比，顯示低碳鋼試片於靜態氧化增重符合擴散之拋物線率。經靜態氧化之後試片外層氧化皮膜

表一 低碳鋼於 800°C 靜態空氣氧化後，不同時間之單位面積重量變化Table 1 The weight change per unit area of the low carbon steel oxidized at 800°C in static air.

Oxidation Time(hr)	Weight Change(g/m^2)
2	+ 165.9
4	+ 224.7
8	+ 291.4

呈紅棕色，且試片表面均有起泡 (blister) 之現象，但並未剝落。圖 5 為試片氧化後之截面金相，氧化皮膜由內而外分別為 FeO 、 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 ，其中氧化皮膜 FeO 、 Fe_3O_4 緻密性良好。文獻指出，純鐵在 800°C 經高溫氧化 2 小時之後，其氧化層 FeO 、 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 的百分比分別為 95.2%、3.6% 和 1.2%^(7,8)。表二為經由金相檢驗法所得各氧化層厚度之百分比，比較表二金相檢驗百分比與純鐵之文獻參考值，可發現其差異相當小。

(二) 金相檢驗法

表三是以 2.3.4 節所述之金相檢驗法量測 T_0 、 T_m ，經由式(3)計算所得之侵蝕總深度。腐蝕速率則是將 2、4、8 小時侵蝕總深度換算到 mm/y 的結果。而鐵重量損失之厚度則是由表一中，各氧化時間之氧化增重，即單位面積氧增加之重量，並配合表二各時間不同氧化皮膜 FeO 、 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 之比例，計算出各時間氧化皮膜內鐵之重量，再將鐵重量除以其密度 $7.86\text{g}/\text{cm}^3$ ，而得到之數據。

(三) 機械法、電解法和化學清洗法之結果

表四為以 2.3.1 節所述之機械法、2.3.2 節所述之電解法和 2.3.3 節所述之化學清洗法去除氧化皮膜後，測量之單位面積重量變化。表五為表四經式(1)計算所得之腐蝕速率。試片以機械法、電解法去除氧化皮膜後，其表面仍呈灰黑色，而以化

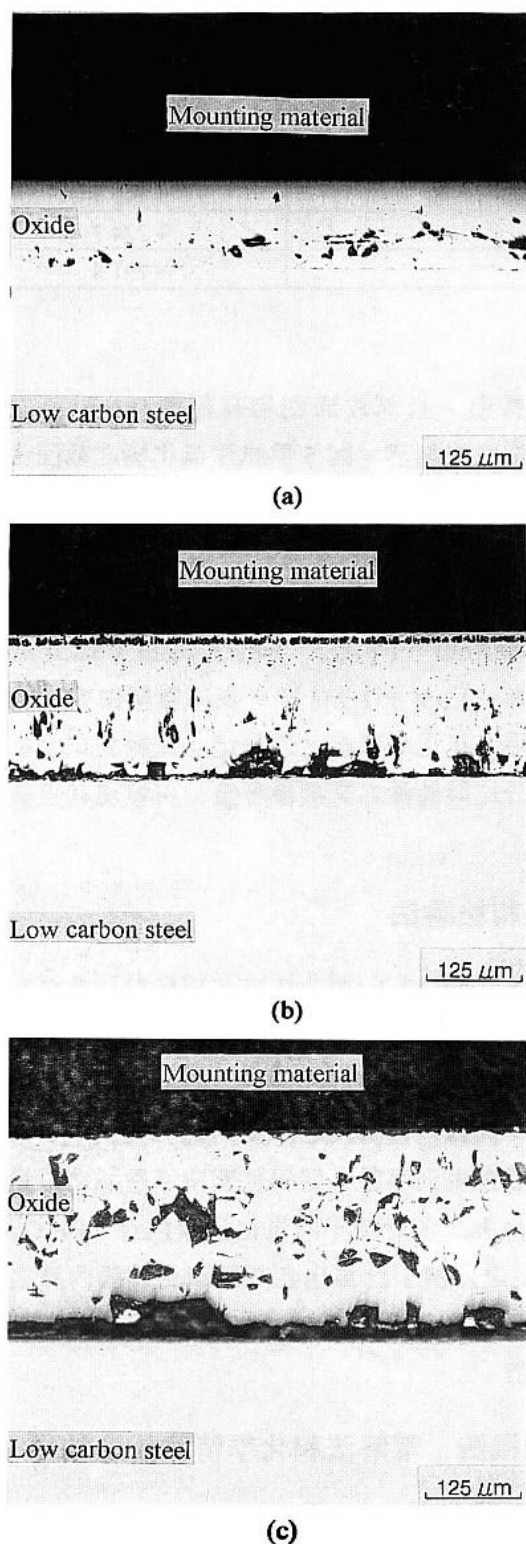


圖 5 低碳鋼經800°C靜態氧化之截面金相，(a) 2小時，(b) 4小時和(c) 8小時

Fig. 5 Cross-sectional micrographs of the low carbon steel oxidized at 800°C in static air, (a) for 2 hrs, (b) for 4 hrs, and (c) for 8 hrs.

學清洗法去除氧化皮膜之試片之表面則呈金屬光澤，並且化學清洗液的顏色由透明逐漸轉變成淡黃色。圖 6 為試片以化學清洗法經20分鐘，單位面積重量變化與清洗時間之結果。如圖 6 顯示，經 2、4 小時氧化之試片於化學洗 8 分鐘後，其重量變化與清洗時間呈斜率較低之線性，而 8 小時之試片則是於清洗 2 分鐘後即呈斜率較低之線性。

四、討 論

比較表三中金相檢驗之侵蝕深度和鐵損失之計算厚度，可發現兩者之間相當接近，顯示金相檢驗法來評估侵蝕總深度相當準確。因此在本研究中將以金相檢驗所得之結果為對照標準，藉此評估機械法、電解法和化學清洗法於去除氧化皮膜之可行性及準確性。

(一)機械法

在本實驗中，以軟毛刷子和超音波振盪除去氧化皮膜，分別以清水和丙酮各振盪 5、10 分鐘之後，試片單位面積的重量損失幾乎相同。表六為以機械法除去氧化皮膜並依式(1)所計算之腐蝕速率，與金相檢驗法之結果相比較可發現其誤差達 14.56% 以上。因此，由表六中之誤差值可知，以機械法除去氧化皮膜來估計腐蝕速率所得的結果誤差很大。

(二)電解法

表七是以 ASTM G1 所規定之 40 分鐘之電解時間進行電解，去除氧化皮膜，並依式(1)計算所得之腐蝕速率，與表三金相檢驗法之結果相比較，可發現其誤差達 10.69% 以上。於更新電解液後，再對試片電解 40 分鐘，及總共電解 80 分鐘後，其誤差達仍 8.10% 以上。而且試片不論經 40 分鐘或是 80 分鐘之電解除銹，其表面均呈灰黑色，表示仍有殘存氧化皮膜附著於試片上。雖然

表二 低碳鋼於800°C經2、4、8小時靜態空氣氧化後，氧化產物厚度百分比及氧化皮膜總厚度

Table 2 The thickness fraction of the oxide products and the total thickness of the oxide scales of the low carbon steel oxidized at 800°C in static air for 2, 4 and 8 hrs.

Oxidation Time (hr)	Fraction of Thickness(%)			Total Thickness of Oxide Scale (μm)
	FeO	Fe ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃	
2	94.81	4.12	1.07	121.3
4	94.01	3.64	2.35	170.5
8	93.39	4.16	2.45	212.5

表三 低碳鋼試片於800°C經2、4、8小時靜態空氣氧化後之侵蝕總深度及金屬損失厚度

Table 3 The total depth of attack and the depth of metal loss of the low carbon steel oxidized at 800°C in static air for 2, 4 and 8 hrs.

Oxidation Time (hr)	Total Depth of Attack*(mm)	Metal Loss** (mm)
2	0.067	0.068
4	0.095	0.095
8	0.125	0.124

Note: *Total depth of attack is obtained from equation(3) by OM examination.

**The metal loss is obtained from the iron mass contributed to iron oxides divided by its density.

ASTM G1中建議以電解來除去氧化皮膜方式對估計腐蝕速率而言其效果最好，然而由於確切電解時間不易掌握，所以利用電解方式並非十分方便。

(三)化學清洗法

以化學清洗法除去氧化皮膜之過程中，由於

氧化皮膜逐漸被化學清液分解，因此隨時間之增長，試片表面之顏色由灰黑色逐漸變而呈金屬色澤。表八為依ASTM G1所規定的10分鐘浸泡時間，對試片進行化學清洗以除去氧化皮膜，並依式(1)計算其腐蝕速率。與表三之金相檢驗法比較，可發現2、4和8小時之誤差分別達0.84%、4.91%和9.66%；而再繼續進行10分鐘之化學清洗，結果發現其誤差則為0.01%、4.56%和10.28%。如圖6顯示，不論是2、4或8小時氧化試片在10~20分鐘清洗過程中其重量變化對時間曲線之斜率均相當小。因此，清洗10分鐘和20分鐘兩者之腐蝕速率誤差相當接近。與機械法和電解法之結果相比較，可以發現化學清洗法所得之結果較為正確。

表九是取圖6中重量變化對時間之斜率由大轉小之前三點，再利用內插求其至重量變化而計算之腐蝕速率，與金相檢驗法之結果相比較，可發現其誤差竟達11.84%以上。由誤差值可知，若試片只清洗到前後兩次重量差比前一次小，即

表四 低碳鋼試片於800°C經2、4、8小時靜態空氣氧化後，以機械法、電解法和化學清洗法除去氧化皮膜之單位面積重量損失

Table 4 The weight change per unit area by mechanical, electrolytic and chemical cleaning of the low carbon steel oxidized at 800°C in static air for 2, 4 and 8 hrs.

Oxidation Time (hr)	The Weight Change Evaluated (g/m ²)		
	Mechanical cleaning	Electrolytic cleaning	Chemical cleaning
2	-429.2	-461.6	-516.7
4	-519.7	-533.0	-578.4
8	-802.9	-811.1	-870.4

表五 低碳鋼試片於800°C經2、4、8小時靜態空氣氧化後，以機械法、電解法和化學清洗法除去氧化皮膜後，由重量損失經式(1)計所得之腐蝕速率

Table 5 The corrosion rates calculated from equation (1) were obtained by mechanical, electrolytic and chemical cleanings of the low carbon steel oxidized at 800°C in static air for 2, 4 and 8 hrs.

Oxidation Time (hr)	Corrosion Rate (mm/y)		
	Mechanical cleaning	Electrolytic cleaning	Chemical cleaning
2	243.40	261.11	294.83
4	147.35	151.13	164.00
8	114.69	113.57	123.40

表六 低碳鋼800°C分別經2、4、8小時靜態空氣氧化後，以機械方式去氧化皮膜相對於金相檢驗估計腐蝕速率之誤差

Table 6 The relative errors of corrosion rates obtained by mechanical cleaning with respect to OM examination of the low carbon steel oxidized at 800°C in static air for 2, 4 and 8 hrs.

Oxidation Time (hr)	Corrosion Rate (mm/y)		Relative Error* (%)
	Mechanical cleaning	OM Examination	
2	243.40	292.37	-16.75
4	147.35	172.46	-14.56
8	114.69	136.60	-16.04

*OM examination acts as a reference standard.

表七 低碳鋼於800°C經2、4、8小時靜態空氣氧化後，以ASTM G1之建議電解時間（40分鐘）和80分鐘電解相對於以金相檢驗估計腐蝕速率誤差

Table 7 The relative errors of corrosion rates obtained by electrolytic cleaning by ASTM G1 for 40 minutes and for 80 minutes with respect to OM examination of the low carbon steel oxidized at 800°C in static air for 2, 4 and 8 hrs.

Oxidation Time (hr)	Electrolytic Cleaning Time (min)	Corrosion Rate (mm/y)		Relative Error (%)
		Electrolytic cleaning	OM Examination	
2	40	261.11	292.37	-10.69
	80	265.69		-9.13
4	40	150.78	172.46	-12.37
	80	158.93		-8.10
8	40	113.30	136.60	-16.86
	80	114.51		-16.17

表八 低碳鋼於800°C經2、4、8小時靜態空氣氧化後，以ASTM G1規定化學清洗時間10分鐘和20分鐘清洗相對於金相檢驗估計腐蝕速率誤差

Table 8 The relative errors of corrosion rates obtained by chemical cleaning by ASTM G1 for 10 minutes and for 20 minutes with respect to OM examination of the low carbon steel oxidized at 800°C in static air for 2, 4 and 8 hrs.

Oxidation Time (hr)	Chemical Cleaning Time (min)	Corrosion Rate (mm/y)		Relative Error (%)
		Chemical cleaning	OM examination	
2	10	294.38	292.37	+0.84
	20	292.41		+0.01
4	10	164.00	172.46	-4.91
	20	164.59		-4.56
8	10	123.40	136.60	-9.66
	20	122.55		-10.28

表九 低碳鋼於800°C經2、4、8小時靜態空氣氧化後，以ASTM G1所規定的化學清洗時間，取單位面積重量變化曲線第二階段平滑部前三點相對於金相檢驗法其腐蝕速率誤差

Table 9 The relative errors of corrosion rates of the first 3 data of smooth curves by ASTM G1 with respect to OM examination of the low carbon steel oxidized at 800°C in static air for 2, 4 and 4 hrs.

Oxidation Time (hr)	Corrosion Rate (mm/y)		Relative Error (%)
	Chemical cleaning*	OM Examination	
2	254.88	292.37	-12.82
4	152.04	172.46	-11.84
8	108.54	136.60	-20.54

*Weight loss data are taken from the first three points of the second stage of the weight change, as shown in Figure 6.

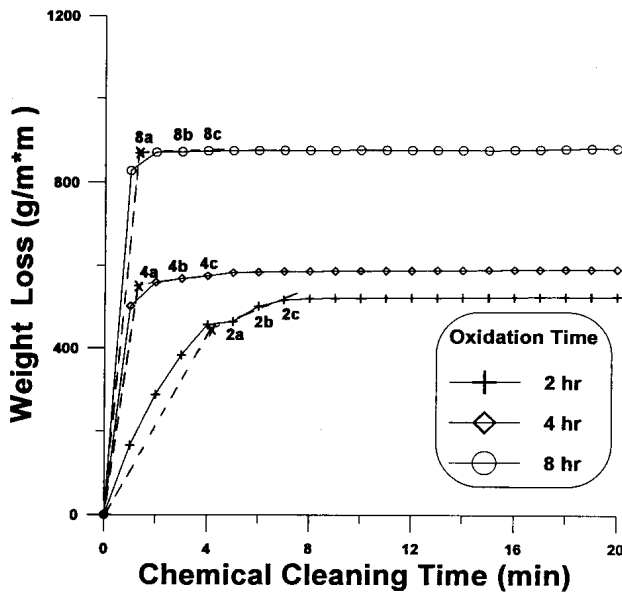


圖 6 ASTM G1-88重量損失與化學清洗時間關係圖

Fig. 6 The relationship between weight loss of corroded specimens and cleaning duration.

計算腐蝕速率其誤差量仍相當地大。

(四)氧化皮膜去除方法之綜合評估

利用ASTM G1規定的三種方法機械法、電解法和化學清洗法去除氧化皮膜，藉由單位面積重量損失來估計腐蝕速率，並以金相檢驗法為標準，所得之誤差如圖7所示。由圖7可知以機械法除去氧化皮膜得到的誤差最大；其次為電解方式，而以化學清洗方式來除去氧化皮膜與金相檢驗方式的結果最接近。而以ASTM G1中A1規定

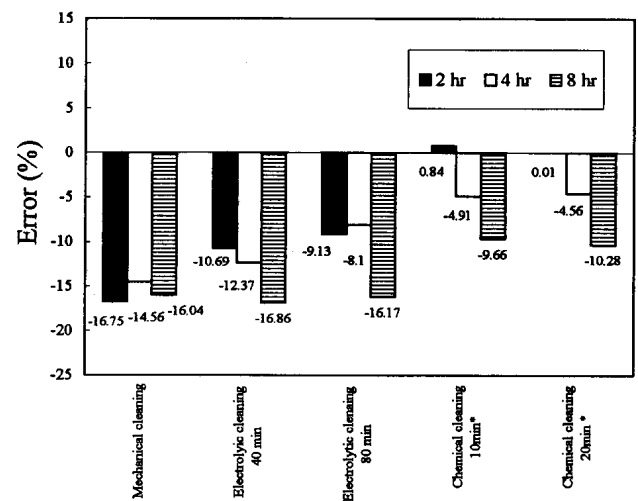


圖 7 機械法、電解法（40、80分鐘）和化學清洗法（10、20分鐘）除去氧化皮膜後，以金相檢驗法為標準，經式(1)計算所得之腐蝕速率誤差

Fig. 7 The relative errors of corrosion rates with respect to the reference standard obtained by OM examination under different cleanings.

之化學清洗時間10分鐘和增長至20分鐘，經式(1)計算所得之腐蝕速率不但兩者之間差值甚小，而且與金相檢驗法之結果相當接近。因此，以化學清洗法除去氧化皮膜來估計腐蝕速率較準確。如圖6所示，低碳鋼其氧化反應之重量變化符合二次拋物曲線之擴散反應，雖然拋物線率有學理上依據，但反應過程中因為可能涉及多種反應機制間之問題存在，而ASTM G1中所提供之方式是以線性之電化學界面反應為基礎來估計腐蝕速率。因此對較長時間之高溫氧化，所測的結果誤

差會較大。

(五)面積之修正

低碳鋼在常溫腐蝕之情況，一般而言，反應產物通常很少，氧化皮膜較薄。因此，面積的改變可以忽略不計。然而在高溫腐蝕環境，若反應產物及氧化皮膜較大時，實際之面積則必須加以修正。而ASTM G1，並未規定面積之修正方式。因此，以ASTM G1腐蝕速率評估高溫氧化程度時，若未修正面積，則將產生誤差，如圖7所示，其誤差率隨反應量之增加而增加。

(六)高溫氧化物件之壽命預估方法

1. 以厚度減損之關係預估腐蝕速率

由金屬損失(metal loss)來預估腐蝕速率，其方式為破壞分析，並且各種條件之下反應會不同，而實際上於構件取樣時無法獲得試片最初重量(initial weight)或是精確的厚度。因此，實際上並不可行。

2. 以拋物線率(parabolic rate)預估腐蝕速率

若以拋物線率來預估腐蝕速率而言，在學理上合理，但事實上商用合金其成分相當複雜，而且受限於分析設備，再加上反應過程中可能會有階段性的反應機制、多種的氧化產物及氧化物破裂(breakaway)的情形產生。另外一方面，欲求得截面積之減損，則必須取得各氧化產物厚度比值的資料，但是這些資料極不容易取得，尤其是固溶產物(solid solution product)。

因此以拋物線率預估高溫氧化物件之使用壽命，雖在學理上合理，但實際應用上並無法實施。

3. 以直線率(linear rate)預估腐蝕速率

如圖八所示，以線性率來預估高溫氧化物件之壽命；若以短時間之腐蝕速率為準，經由外插來預估較長時間之腐蝕速率，所得之結果比實際值要高，如圖八中(a)直線所示，若以長時間之腐

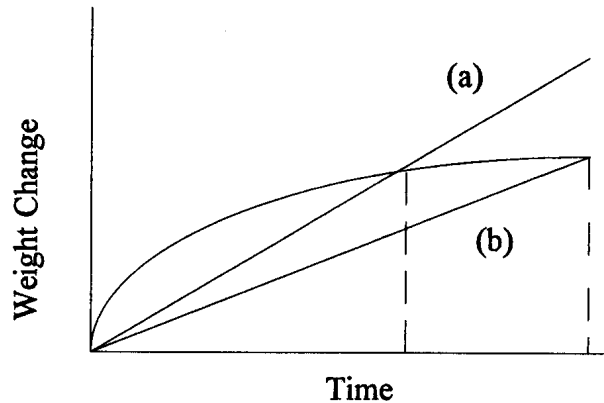


圖 8 高溫氧化之拋物線率與線性率反應之關係示意圖
Fig. 8 The hypothesis kinetics curves of the parabolic behavior and the linear behavior on high-temperature oxidation.

蝕速率為準，經由內插來預估較短時間之腐蝕速率，所得之結果則比實際值要低，如圖八中(b)直線所示。

因此，對評估高溫氧化物件之壽命，最好的方法是實際監測，或是使用相同狀態的實際試驗。若欲減少試驗之時間及方便性，線性率仍是不得已中較方便的方法，但預計時必須注意是否高估或低估了腐蝕速率。

五、結 論

1. 本研究以金相檢驗法為標準，比較ASTM G1所提供的三種方式去除氧化皮膜估計腐蝕速率。結果顯示，對於低碳鋼之高溫氧化皮膜，以化學清洗方式最準，電解法次之，而機械法效果最差。
2. ASTM G1推薦以A2之電解法去除氧化皮膜的效果較好，但由於將氧化皮膜去除之確切電解時間不易掌控。因此，電解時間成為此法施行上影響最大之因素。
3. ASTM G1規定之計算是以符合線性率之電化學界面反應為基礎來評計腐蝕速率。因此，若以短時間之線性速率預估擴散控制拋物線率之高溫氧化反應量，會產生高估的錯誤；反之，

以長時間之線性速率評估短時間之高溫氧化反應量，則會發生低估的錯誤。

4. 對於高溫腐蝕之特性評估，線性腐蝕速率具有理論上的錯誤，而拋物線率則有實施上的困難，因此仍是以實際模擬為最正確。
5. 以ASTM G1腐蝕速率評估高溫氧化程度時，若未修正面積，則將產生誤差，且誤差率隨反應量之增加而增加。

謝 誌

本研究承國科會NSC 85-2216-E011-029經費援助，特此致謝。

參考文獻

1. "Standard Recommended Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals," ASTM Designation G31-85, ASTM Committee Standards.
2. "Standard Recommended Practice for Simple Static Oxidation Testing," ASTM Designation G54-84, ASTM Committee Standards.
3. "Standard Recommended Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating," ASTM Designation G1-88, ASTM Committee Standards.
4. "Standard Recommended Practice for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion Testing of Metals," ASTM Designation G31-85, ASTM Committee Standards.
5. N. Birks and G.H. Meier, in: "Introduction to High Temperature Oxidation of Metals", Edward Arnold, London, 1983, p.40
6. G.Y. Lai, in: "High Temperature Corrosion of Engineering Alloys", ASM (1990), P.P, 19-31
7. S.Y. Lee and M.J. McNallan: J. Electrochem. Soc., 137(1990)472
8. J.K. Stanley, J. Hoene and R.T. Huntoon; Trans. A.S.M., 43(1951)426