

# 低合金鋼錠矽和鋁含量 對其在模擬燃燒氣氛之高溫氧化的影響

張耀南\* 著

Effects of Silicon and Aluminum Contents  
in a Low Alloy Steel Ingot on High Temperature Oxidation  
in a Simulated Combustion Atmosphere

*Yao-Nan Chang*

## 摘要

本文是研究低合金鋼錠中不同 Si(0.5~2%) 和 Al(0, 0.4%) 含量對其在 1050°C 實驗室模擬燃燒氣氛(含 CO<sub>2</sub> 6.55%、水蒸氣 1.84%、O<sub>2</sub> 3.75%、N<sub>2</sub> 70.86%) 3 小時之高溫氧化的影響，研究方法包括氧化動力研究、高溫鈎皮黏附性試驗、氧化生成物分析。結果顯示各鋼錠之氧化動力曲線均滿足二次拋物線定律，其氧化速率常數值介於 44~124 mg<sup>2</sup>/cm<sup>4</sup> · min，不論有無添加 Al，提高 Si 含量將使 FeO + Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 鈎層愈緻密或所佔的比例愈多，因此有降低氧化之作用，添加 0.4% Al 之效應依 Si 含量的不同而不同，Si 含量為 0.5% 時，因鈎皮／底材界面有 FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>，有降低氧化之作用，Si 含量為 1% 時，因微量的 Al<sup>3+</sup> 使 FeO p 型半導體產生摻雜效應，反使氧化提高，Si 含量為 1.5% 或 2% 時，添加 Al 無法發生效應，故氧化量無差異。至於對高溫鈎皮黏附性的影響，當 Si 含量提高至 2% 之時才能顯示 Si 使高溫鈎皮黏附性微量提高，添加 Al 對鈎皮黏附性之效應則甚微。

## ABSTRACT

This paper is to investigate the effects of Si(0.5~2%) and Al(0, 0.4%) contents in a low alloy steel ingot on the high temperature oxidation in a laboratory simulated flue atmosphere(containing CO<sub>2</sub> 6.55%, water vapor 18.84%, O<sub>2</sub> 3.75%, N<sub>2</sub> 70.86%) at 1050°C for 3 hours. Experimental methods include oxidation kinetics study, high temperature scale adherence test, and analysis of oxidation products. The results indicate that the oxidation kinetics of each ingot obeys parabolic

\*中國鋼鐵公司鋼鋁研究發展處

rate law with oxidation rate constant in the range  $44\sim124 \text{ mg}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{min}$ . No matter Al is alloyed or not, increasing the Si content increases the compactness or the amount of the  $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ , the oxidation is thus reduced. Effect of alloying 0.4% Al depends on the Si content. With 0.5% Si, it reduces the oxidation due to the protective  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$  at the scale/base metal interface. With 1% Si, small amount of  $\text{Al}^{+3}$  induces doping effect of the p-type semiconducting  $\text{FeO}$  scale and promotes the oxidation. With 1.5% or 2% Si, alloying Al can not give significant effect and does not affect the oxidation. High temperature scale adherence test indicates that 2% Si reveals slight increase in scale adherence and Si does not give significant effect below this content. On the other hand, alloying Al does not give significant effect on the adherence.

## 一、前 言

矽和鋁是低合金鋼中重要的合金元素，譬如，在煉鋼過程中常以此二種元素脫氧而使鋼胚中含有或多或少的 Si 和 Al 合金，高溫用鋼添加 Si 和 Al 有抗氧化的作用<sup>(1)</sup>，電磁鋼片添加 Si 和 Al 可提高鋼片的電阻、降低渦電流損失和鐵損值<sup>(2,3)</sup>。但在上游生產過程中，此二種合金元素可影響鋼胚在加熱爐的高溫氧化性能，更進而影響熱軋時高壓水的除銹性，若除銹有殘留銹皮，則將被軋入底材而產生軋入銹皮，若下游是冷軋產品，則軋入銹皮將造成酸洗困難，使冷軋成品品質不佳，故需瞭解此二種合金元素在燃燒氣氛之高溫氧化的影響，以便於軋延該含量之鋼胚時改進之依據。傳統的低合金鋼高溫氧化研究上， $\text{Fe}-\text{Si}$  系統<sup>(4-6)</sup>和  $\text{Fe}-\text{Al}$  系統<sup>(4,7-9)</sup>之報告很多，但  $\text{Fe}-\text{Al}-\text{Si}$  系統則較少<sup>(4)</sup>，本文是研究不同矽和鋁含量對低合金鋼錠在實驗室模擬燃燒氣氛之高溫氧化的影響。

## 二、研究方法與步驟

### 1. 試驗鋼材

含 0.5~2% Si、0~0.4% Al 之低合金鋼錠是以真空爐熔煉，其成份如表 1 所示。

### 2. 氧化氣氛

含  $\text{CO}_2$  : 6.55 vol%，水蒸氣 : 18.84 vol%， $\text{O}_2$  : 3.75 vol%， $\text{N}_2$  : 70.86 vol% 之氣氛。

### 3. 高溫銹皮黏附性試驗

實驗室模擬加熱爐氣氛之裝置如圖 1 所示，以獲得總流量為  $500 \pm 10 \text{ cc/min}$  之上述氣氛，以流量計口徑為  $0.7 \text{ cm}$ ，計算其總流量遠在 Jominy 和 Murphy<sup>(10)</sup> 所測得在  $1230^\circ\text{C}$  之臨界流速 (Critical Speed) 以上，亦遠在 Tomlinson 和 Catchpole<sup>(11)</sup> 所測得在  $600\sim1000^\circ\text{C}$  之臨界流速以上，因此吾人可假設  $500 \text{ cc/min}$  之總流量亦應遠在  $1050^\circ\text{C}$  之臨界流速以上，所以本實驗過程中若流量有微小變化，對氧化速率應無影響。將試片切成  $28 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  大小，放在  $1050^\circ\text{C}$  之爐內 3 小時，求單位面積的重量增加  $\Delta W_s$ 。另外，相同氣氛氧化 3 hr 後高溫以噴水冷卻，使部份（或全部）銹皮剝落，求單位面積的重量增加  $\Delta W_r$ （若噴水後之重量比氧化前輕，則  $\Delta W_r$  值當然為負）則  $\Delta$

# 低合金鋼錠矽和鋁含量對其在模擬燃燒氣氛之高溫氧化的影響

表 1 本文試驗之電磁鋼錠的化學成份

Table 1 Chemical compositions of the low alloy steel ingots used in the present investigation.

| Ingot Element | C     | Si   | Mn   | P     | S     | Al    | N  |
|---------------|-------|------|------|-------|-------|-------|----|
| A             | Trace | 0.50 | 0.31 | 0.058 | Trace | Trace | 18 |
| B             | Trace | 0.97 | 0.32 | 0.001 | Trace | Trace | 18 |
| C             | Trace | 1.51 | 0.32 | 0.001 | Trace | Trace | 29 |
| D             | Trace | 2.03 | 0.32 | 0.001 | Trace | Trace | 17 |
| E             | Trace | 0.53 | 0.32 | 0.059 | Trace | 0.37  | 11 |
| F             | Trace | 0.99 | 0.33 | 0.002 | Trace | 0.37  | 14 |
| G             | Trace | 1.56 | 0.33 | 0.001 | Trace | 0.39  | 17 |
| H             | Trace | 2.10 | 0.32 | 0.001 | Trace | 0.38  | 12 |

Balance: Fe

Unit: N in ppm, other elements in wt%

Thickness: 205 mm

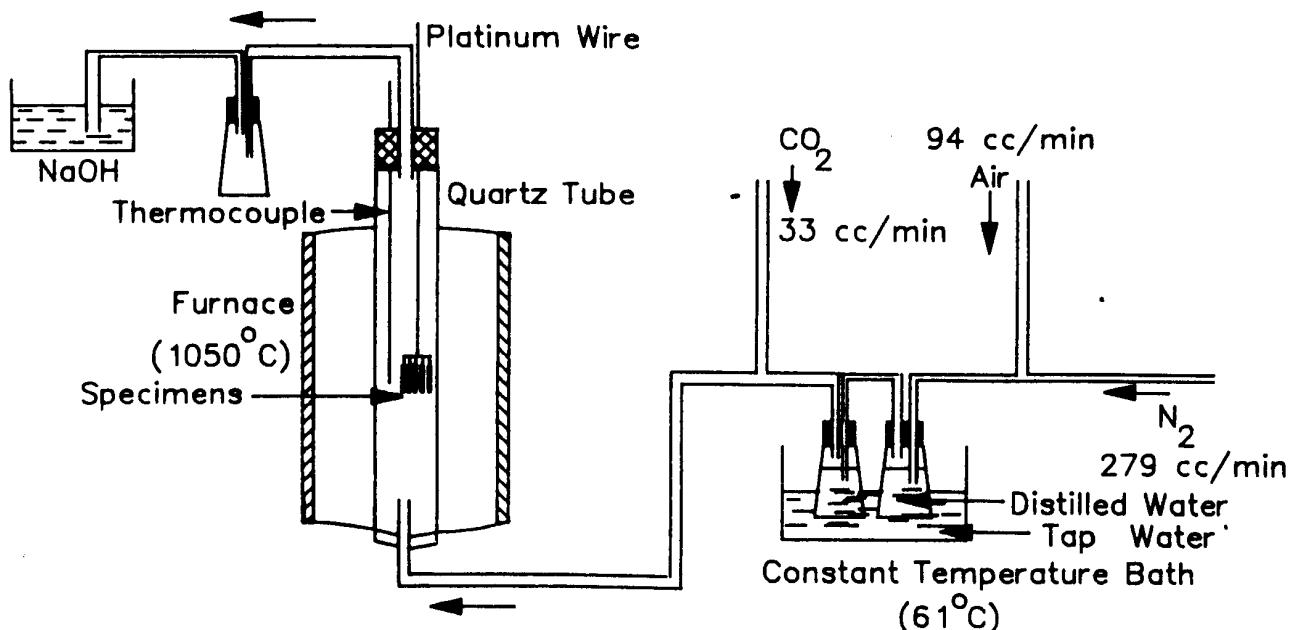


圖 1 實驗室模擬燃燒氣氛高溫氧化試驗裝置示意圖。

Fig. 1 Schematic setup of laboratory high temperature oxidation tests in combustion atmosphere.

$W_s - \Delta W_s$  值愈大的鋼材表示其高溫錫皮黏附性愈小，此種評估錫皮黏附性的方式首度由 Sherwood 和 Shatynski<sup>(12)</sup> 所提出，本文

中各種鋼錠測試三次，求平均值和標準誤差 (Standard Error)。

## 4. 高溫氧化動力試驗

將上述氧化氣氛通於1050°C之爐內，以 C. I. Electronics 之熱重分析儀 (TG)<sup>(13)</sup>測試 3 小時，氣體總流量為  $200 \pm 3 \text{ cc/min}$  (此流量亦仍在上述之臨界流速以上)，以瞭解其氧化動力 (Oxidation Kinetics, i. e. 單位面積的重量增加對氧化時間的關係)，各種鋼錠測試二次，任何二種鋼錠之氧化動力曲線有無差異則以此二次測試之結果所含蓋之區域有無重疊來判定。譬如圖 2 是鋼錠 A 和 B 之測試結果，因其測試二次所含蓋之區域無重疊，故判定 A 之氧化量比 B 大，同理，其他鋼材若所含蓋之區域大部份有重疊，則謂此二鋼材之氧化量無差異。TG 的試片準備方式與前置研究的方式<sup>(14)</sup>相同。

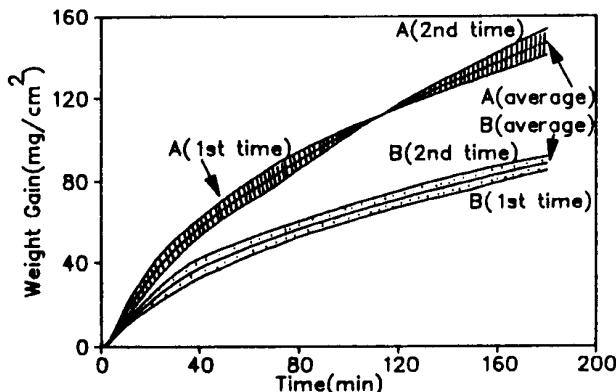


圖 2 鋼錠 A 和 B 之兩次 TG 測試結果。

Fig. 2 Results of the duplicate TG tests of Ingots A and B.

## 5. 氧化生成物分析

包括 X 光繞射和電子微探分析 (EPMA)。前者是試片在圖 1 之爐內氧化 3 小時後，將錫皮刮下磨成粉末，以 Siemens X 光繞射儀為之 ( $\text{Co K}\alpha$  靶  $\lambda = 1.7889 \text{ \AA}$ )，用戴薛氏技術 (Debye-Scherrer) 將圖樣攝下分析 (曝光 4 hr，電流 25 mA，電壓

35 kV)。後者是將進行 TG 試驗後之試片以鑽石膏拋光至  $0.25 \mu\text{m}$ ，蒸鍍一層薄石墨，以 Cameca SX 50 電子微探分析儀觀察剖面的微組織結構，並以 WDS (Wavelength Dispersive Spectrometer) 分析元素分佈。

## 三、結果與討論

圖 3 和圖 4 是 TG 試驗結果，各曲線是測試二次的平均值。圖 3 顯示不加 Al 之鋼錠 Si 含量從 0.50% 提高至 0.97% 時氧化量明顯降低，但 Si 繼續增加至 2.03% 時氧化量

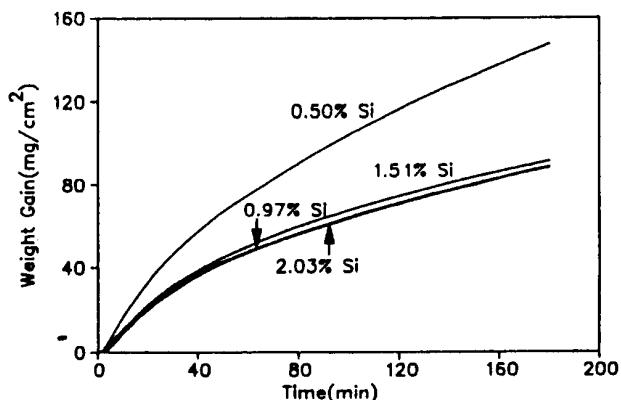


圖 3 不含 Al 之各鋼錠的 TG 測試結果。

Fig. 3 Results of the TG tests of ingots with Al trace.

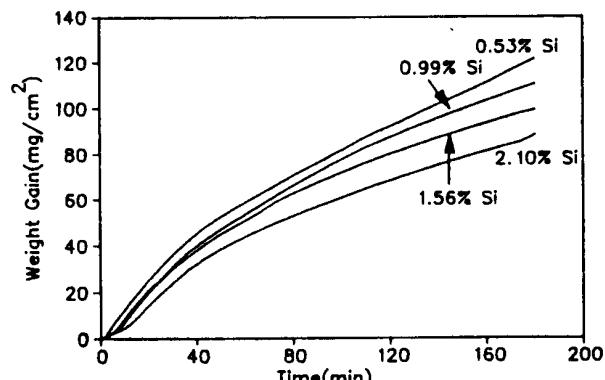


圖 4 添加 Al 之各鋼錠的 TG 測試結果。

Fig. 4 Results of the TG tests of ingots alloyed with Al.

## 低合金鋼錠矽和鋁含量對其在模擬燃燒氣氛之高溫氧化的影響

無差異。圖 4 顯示含 Al 之鋼錠的氧化量隨 Si 含量之增加而降低。各鋼材的氧化動力曲線之二次線性迴歸 (Linear Regression) 的  $R^2$  值 (Square of Associated Correlation Coefficient) 均  $\geq 0.99$ ，故這些曲線都滿足二次拋物線，i. e. 氧化動力滿足

其含義為氧化錫皮含有或多或少的保護性，以致氧化速率由離子在錫皮內之擴散所決定，其中  $y$  是單位面積之重量增加， $t$  是氧化時間， $K$  是氧化速率常數（Oxidation Rate Constant），各鋼錠之  $K$  值計算結果如表 2 所示，文獻中無類似條件之  $K$  值可供比較。若將相同矽含量的鋼錠之氧化動力曲線畫在同一圖上，則如圖 5-8 所示。圖 5 顯示含 0.5% Si 鋼若添加 0.37% Al 將使氧化量降低，圖 6 顯示含 1% Si 鋼添加 Al 將提高氧化。圖 7、圖 8 分別顯示含 1.5% 和 2% Si 鋼添加 Al 對氧化量無影響。

表 2 各鋼錠之氧化動力曲線以線性迴歸所得之速率常數 K 的值

**Table 2** Rate constants K estimated from linear regression of the oxidation kinetics of all the ingots.

| Ingot                 | K( $\text{mg}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{min}$ ) |
|-----------------------|---|
| A(0.50% Si, Al Trace) | 123.8   |
| B(0.97% Si, Al Trace) | 45.3  |
| C(1.51% Si, Al Trace) | 48.9  |
| D(2.03% Si, Al Trace) | 45.0  |
| E(0.53% Si, 0.37% Al) | 81.0  |
| F(0.99% Si, 0.37% Al) | 70.8  |
| G(1.56% Si, 0.39% Al) | 58.0  |
| H(2.10% Si, 0.38% Al) | 44.0  |

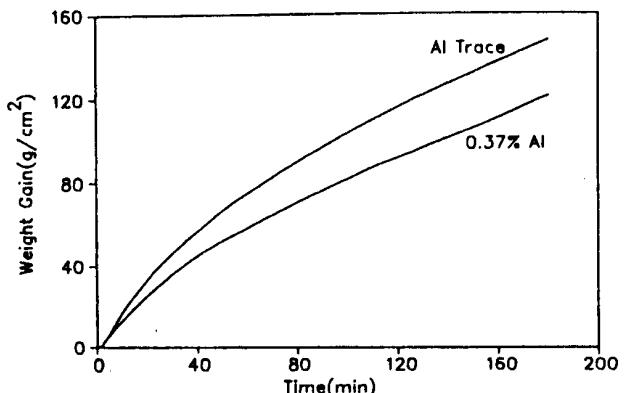


圖 5 含 0.5% Si 之各鋼錠的 TG 測試結果。

Fig. 5 Results of the TG tests of ingots containing 0.5% Si.

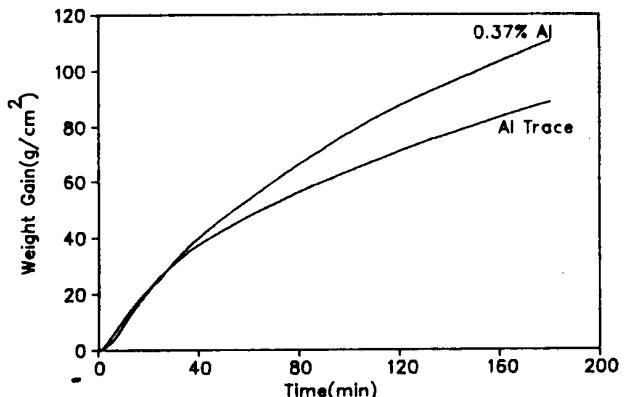


圖 6 含 1% Si 之各鋼錠的 TG 測試結果。

Fig. 6 Results of the TG tests of ingots containing 1% Si.

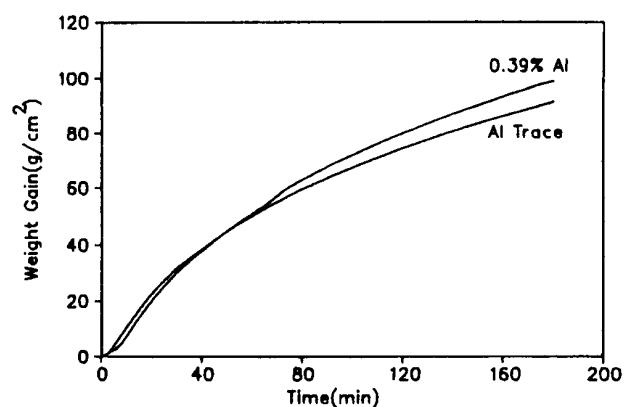


圖 7 含 1.5% Si 之各鋼錠的 TG 測試結果。

Fig. 7 Results of the TG tests of ingots containing 1.5% Si.

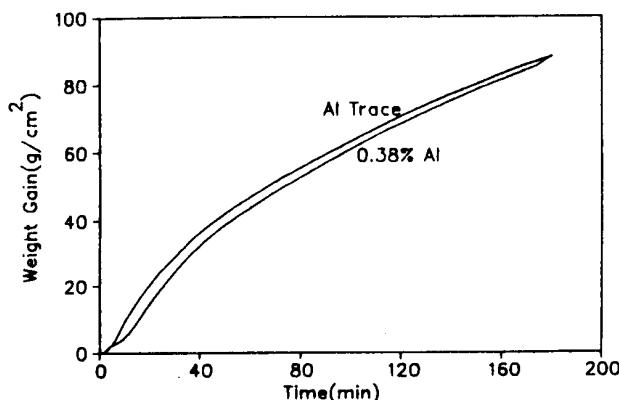


圖 8 含 2 % Si 之各鋼錠的 TG 測試結果。

Fig. 8 Results of the TG tests of ingots containing 2% Si.

表 3 是氧化生成物經 X 光繞射結果以繞射檔案所鑑定出的物種，不含 Al 之各鋼錠的氧化主要生成物都是  $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，次要生成物都是  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ (Iron Silicate)。含 0.5% Si 鋼添加 0.37% Al 將產生少量的  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ，但是含 1~2% Si 鋼添加 Al 對氧化生成物無影響，顯然是因 Si 含量太高使 Al 無法發生選擇性氧化雖然 Al 之氧化性比 Si 強<sup>(15)</sup>。

EPMA 影像照片如圖 9、圖 10 所示，各鋼錠之氧化錫皮總厚度(1~1.5 mm)與 Ghosh 和 Rolls<sup>(16)</sup>之鋼材在 1050°C 模擬燃燒氣氛氧化 4 小時之錫皮厚(1.4 mm)具有相同數量級。圖 11(a)是圖 9(a)之 WDS 線掃描，結合表 3 之 X 光繞射結果可判定最外層錫皮是  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，這是氧化氣氛含有過剩氧氣所造成<sup>(16)</sup>，其他錫層由外往內依次為  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}$ ，最內層為含  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  之  $\text{FeO}$ ，圖 9(b)亦有類似錫層(雖然其線掃描圖未示出)，但其最內層錫皮比圖 9(a)緻密，保護性較好，因此 TG 試驗顯示 Si 含量從 0.50% 提高至 0.97% 時氧化量降低(圖 3)，圖 9(c)、9(d)顯示含  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  之  $\text{FeO}$  的最內層錫皮亦和圖 9(b)一樣緻密(雖然  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  分佈於整個  $\text{FeO}$  錫層)，顯示 Si 從 0.97% 提高至 2.03% 時此錫層已無法再容納含矽氧化鐵，故圖 3 中的氧化量無差異。圖 11(b)是圖 10(a)之 WDS 線掃描，亦可鑑定錫層由外至內依次為  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 、 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4 + \text{FeAl}_2\text{O}_4$ ，同法亦可鑑定其

表 3 氧化生成物之 X 光繞射分析結果  
Table 3 Results of x-ray diffraction analyses of the oxidation products.

| Ingot                 | Major Phase  | Minor Phase   |
|-----------------------|--|---|
| A(0.50% Si, Al Trace) | $\text{FeO}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$                             |
| B(0.97% Si, Al Trace) | $\text{FeO}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$                             |
| C(1.51% Si, Al Trace) | $\text{FeO}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$                             |
| D(2.03% Si, Al Trace) | $\text{FeO}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$                             |
| E(0.53% Si, 0.37% Al) | $\text{FeO}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ , $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ |
| F(0.99% Si, 0.37% Al) | $\text{FeO}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$                             |
| G(1.56% Si, 0.39% Al) | $\text{FeO}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$                             |
| H(2.10% Si, 0.38% Al) | $\text{FeO}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$                             |

Major Phase: Phase with "strong" or "very strong" primary intensity.

Minor phase: Phase with "weak" primary intensity.

低合金鋼錠矽和鋁含量對其在模擬燃燒氣氛之高溫氧化的影響

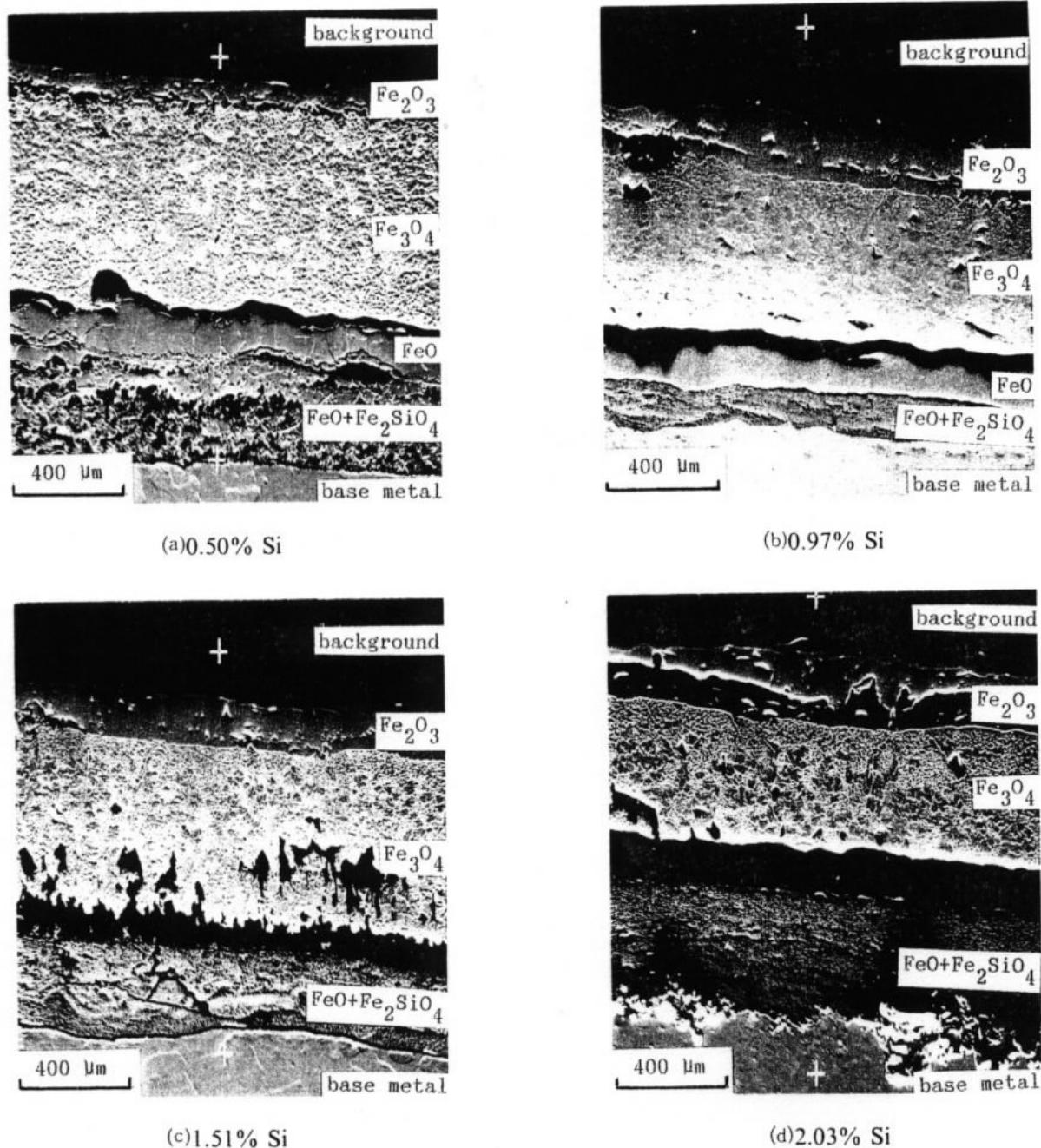


圖9 不含Al之各鋼錠氧化鈹皮的EPMA影像照片。

Fig. 9 EPMA micrographs of the oxidation scales on ingots with Al trace.

他鋼錠的各鈹層如圖10(b)–(d)所標示。其中較有趣的是圖10(b)之 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 鈹層亦含有微量鋁雖然其X光繞射無 $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ 或其他含鋁氧化物，Si從0.53%提高至2.10%時其 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 鈹層逐漸變得緻密或

所佔之厚度比例變得較多，故圖4之氧化量亦逐漸減少，總之，不論有無添加Al，提高Si含量有降低氧化量之作用，這與 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 鈹層的緻密性或所佔的比例有關。若欲瞭解添加Al之效應，比較圖9(a)和

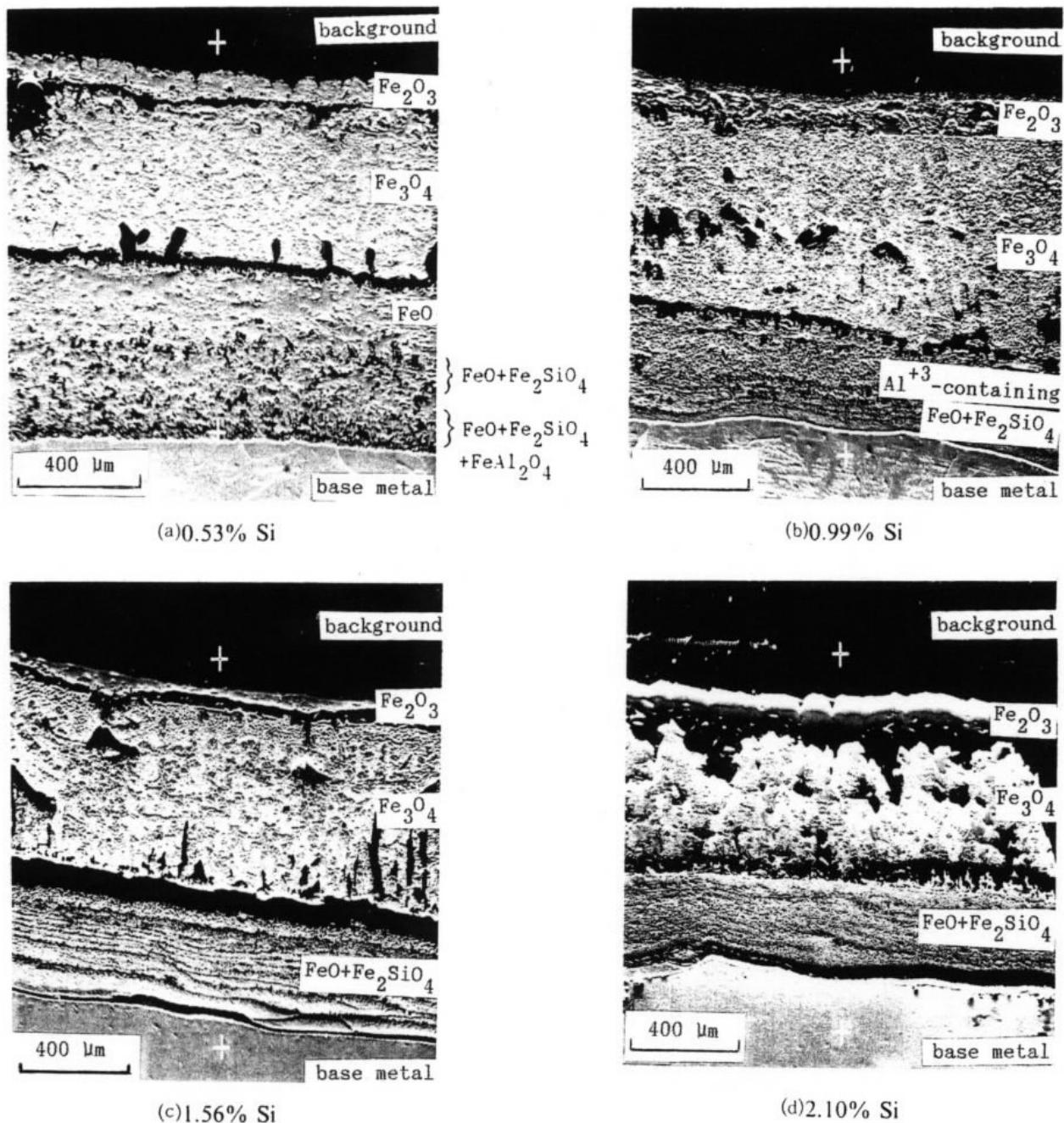


圖10 添加Al之各鋼錠氧化銹皮的EPMA影像照片。

Fig. 10 EPMA micrographs of the oxidation scales on ingots alloyed with Al.

圖10(a)顯示添加0.37% Al使 $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ 聚集在最內層銹皮和底材界面，亦有保護的作用，因而圖5顯示其氧化量減低，早期文獻<sup>(17)</sup>亦有這種靠富集 $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ 保護的報導。比較圖9(b)和圖10(b)顯示添加0.37% Al將有少

量 $\text{Al}^{+3}$ 分散於整個 $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 銹層，看不出其保護性，反易產生半導體的摻雜(Doping)效應， $\text{FeO}$ 是p型半導體(缺 $\text{Fe}^{+2}$ )，若含微量 $\text{Al}^{+3}$ 將增加陽離子空隙濃度，使氧化過程中離子擴散速率提高，

## 低合金鋼錠矽和鋁含量對其在模擬燃燒氣氛之高溫氧化的影響

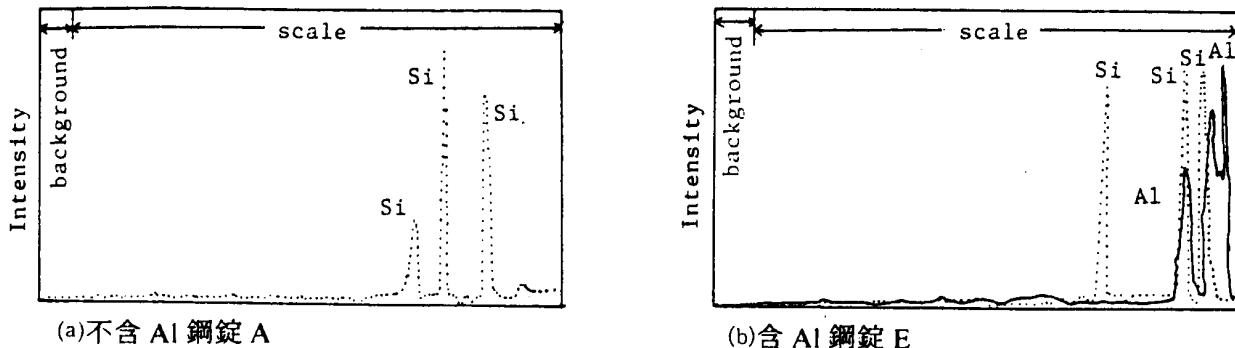


圖11 含0.5% Si 鋼錠氧化錫皮（圖9(a)、圖10(a)）中兩個十字架間的 Si 和 Al 之 WDS 線掃描。

Fig. 11 WDS analyses, line scans of Si and Al, of the oxidation scales on ingots containing 0.5% Si.  
(Area analyzed is the area between the two +'s)

因此氧化速率提高（圖6），這種靠微量Al產生摻雜效應而提高氧化的報告文獻中亦有先例報導<sup>(17,18)</sup>。比較圖9(c)和圖10(c)或比較圖9(d)和圖10(d)顯示因Si含量太高，添加Al無法發生效應，故圖7和圖8顯示氧化量無差異，總之，添加Al之效應依Si含量的不同而不同，Si含量為1%時，因微量的Al<sup>+3</sup>使FeO p型半導體產生摻雜效應，反使氧化提高，Si含量為1.5%或2%時，添加Al無法發生效應，故氧化量無差異。

高溫錫皮黏附性試驗結果如圖12、圖13所示。圖12顯示不含Al之鋼錠當Si從0.50%提高至1.51%時因測量誤差太大，吾人無法分辨出黏附性的差異，祇有在Si達到2.03%時才看出黏附性微量提高，圖13顯示含Al之鋼錠亦有類似結果，可能這是最內層錫皮 Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>所造成。比較圖12和圖13則顯示添加Al對黏附性無明顯效應。

## 四、結論

本文可得到下列四點結論：

1. 在1050°C模擬燃燒氣氛3小時之高溫氧化動力曲線滿足二次拋物線定律，各鋼錠之氧化速率常數值介於44~124 mg<sup>2</sup>/cm<sup>4</sup>·

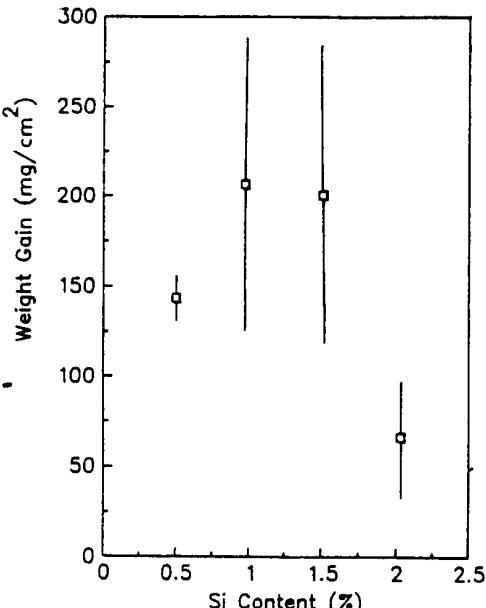


圖12 不含 Al 之各鋼錠高溫氧化的  $\Delta W_g - \Delta W_t$  測試結果。

Fig. 12 Test results of  $\Delta W_g - \Delta W_t$  during high temperature oxidation of ingots with Al trace.

min<sup>o</sup>

2. 不論有無添加Al，提高Si含量將使FeO+Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>錫層愈緻密或所佔的比例愈多，因此有降低氧化之作用。
3. 添加Al之效應依Si含量的不同而不同，

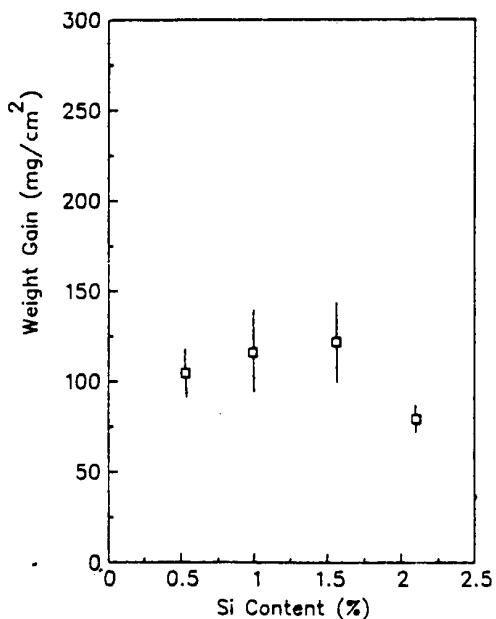


圖13 添加 Al 之各鋼錠高溫氧化的  $\Delta W_t - \Delta W_s$  測試結果。

Fig. 13 Test results of  $\Delta W_t - \Delta W_s$  during high temperature oxidation of ingots alloyed with Al.

Si 含量為 0.5% 時，因錫皮／底材界面有  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ，有降低氧化之作用，Si 含量為 1% 時，因微量的  $\text{Al}^{+3}$  使  $\text{FeO}$  p 型半導體產生摻雜效應，反使氧化提高，Si 含量為 1.5% 或 2% 時，添加 Al 無法發生效應，故氧化量無差異。

4. Si 含量提高至 2% 時才能顯示 Si 使高溫錫皮黏附性微量提高，添加 Al 對錫皮黏附性之效應則甚微。

### 致謝

筆者感謝中鋼公司吳進福、許瑞民協助實驗室氧化試驗工作，陳汝江協助 X 光繞射，李福生協助 EPMA 分析。

### 參考資料

(1) Y. N. Chang and F. I. Wei: J. Mat'l Sci., 24 (1989) 14.

- (2) L. J. Regitz: J. Appl. Phys., 41, 3 (1970) 1030.
- (3) D. Y. Chiang and C. K. Hou: Chinese J. Mat'l Sci., 19, 3 (1987) 222.
- (4) J. A. von Fraunhofer and G. A. Pickup: Anti-Corrosion, Apr. (1970) 10, May (1970) 10.
- (5) A. Atkinson: Corrosion Sci., 22 (1982) 87.
- (6) W. W. Smeltzer, L. A. Morris, and R. C. Logani: Can. Metall. Quart., 9 (1970) 513.
- (7) J. B. Newkirk(ed.): "High Temperature Materials Coatings and Surface Interactions", Freund, Tel-Aviv, Israel (1980) 1.
- (8) F. Saequsa and L. Lee: Corrosion, 22 (1966) 168.
- (9) Z. Z. Huang and R. Z. Zhu: Proc. JIMIS 3 (1983) 231.
- (10) W. E. Jominy and D. W. Murphy: Trans. Am. Soc. Steel Treat., 18 (1930) 19, cited in W. J. Tomlinson and S. Catchpole: Corrosion Sci., 8 (1968) 845.
- (11) W. J. Tomlinson and S. Catchpole: Corrosion Sci., 8 (1968) 845.
- (12) W. Sherwood and S. R. Shatynski: Surface Technol., 21 (1984) 39.
- (13) R. C. Lobb: Inter. Vacuum Microbalance Conf., Plymouth, Aug. (1983) 1.
- (14) 張耀南：中華民國防蝕工程，5，4 (1991) 12.
- (15) I. Barin and O. Knacke(ed.): Thermochemical Properties of Inorganic Substances, Springer-Verlag, Berlin (1973) 32, 690.
- (16) A. K. Ghosh and R. Rolls: Iron & Steel, June (1969) 151.
- (17) W. E. Boggs: "The Role of Structure and Compositional Factors in the Oxidation of Iron and Iron-based Alloys", in "High Temp. Gas-Metal Reactions in Mixed Environments" (ed. S. A. Jansson & E. A. Foronlis), AIME, Boston, MA (1972) 1.
- (18) J. B. Newkirk(ed.): "High Temperature Materials Coatings and Surface Interactions", Freund, Tel-Aviv, Israel (1980) 1.