

熱軋鋼捲軋延銹皮與氧化銹皮之研究

張耀南*

A Study of Scale Formation during Hot Rolling and Oxide Scales of As-rolled Steel Coils

Yao-Nan Chang*

摘 要

本文是在實驗室以 850~1150°C 模擬氧化研究熱軋鋼捲軋延溫度與軋入銹皮之關係，並分析實際現場熱軋完軋鋼捲氧化銹皮與內儲致銹性的關係。實驗方法包括氧化與曝露試驗、氧化銹皮分析、鋼材硬度與抗拉強度測試、完軋鋼捲腐蝕電位量測與底材金相觀察。結果顯示氧化溫度愈高，生成銹皮的 FeO 含量愈少，Fe₃O₄ 含量愈多，銹皮硬度愈大，銹皮和底材硬度的比值也更大，較易被軋入底材而造成軋入銹皮。

完軋鋼捲若銹皮含較多的孔隙，外界的腐蝕性氣氛較容易經由孔隙進入銹皮內部與底材反應，則易產生點狀銹蝕。

關鍵詞：銹皮，軋入銹皮，熱軋鋼捲，腐蝕電位。

ABSTRACT

The simulated oxidation behavior between the rolling temperature and the rolled-in-scale of hot-rolled steel coils has been investigated over the temperature range of 850~1150°C. The relationship between the indoor rusting and the oxide scale of as-rolled steel coils has also been investigated. The methods included oxidation and rusting tests, microstructural analyses of oxide scales and the substrate, hardness and tensile testing, and the measurements of corrosion potential of as-rolled steels. The results showed that the higher the temperature, the more amount of Fe₃O₄, but the less amount of FeO present in the scales. The hardness ratio of the scales to the substrate also increased with increasing temperature, resulting in an easier increase the amount of rolled-in-scales during the rolling process.

Concerning the oxide scales of the as-rolled steel coils, the more the pores in the scales, providing the shortcut of the corrosive species in the environments to diffuse through the scale and react with the substrate, the easier the point rusts could form in the scales.

Keywords : Scale, Rolled-in Scale, Hot-rolled Steel Coil, Corrosion Potential

一、前言

熱軋鋼捲在軋延時容易產生軋入銹皮(進軋

機前未去除乾淨而被軋入底材之銹皮)，此種缺陷影響熱軋鋼材表面品質至鉅，不但是熱軋工場

*中鋼公司鋼鋁研究發展處

Steel and Aluminum R&D Dept., China Steel Corporation, Kaohsiung, Taiwan, R.O.C

剔退主要項目之一，也是客戶抱怨的主要項目。根據統計，常發生的軋入銹皮以二次或三次銹皮最多，前者係指鋼捲從粗軋至精軋前產生的銹皮，溫度約 $1050 \sim 1150^{\circ}\text{C}$ ，後者指在精軋時產生的銹皮，溫度約 $850 \sim 1050^{\circ}\text{C}$ ，故須研究其高溫氧化銹皮特性，以尋求此二類型銹皮改善之道。早在 1965 年 Williams 和 Boxall⁽¹⁾ 就發現熱軋鋼捲若軋延溫度超過 900°C ，則會因熱疲勞(Thermal Fatigue)和硬的氧化鐵所造成的磨耗而傷害軋輪，更進而使完軋鋼捲產生流星狀(Comet Tail)軋入銹皮，雖然傷害熱軋軋輪的機構有很多種，但他們認為仍以熱疲勞和硬銹皮之磨耗為最重要。Horvath⁽²⁾ 的研究亦發現熱疲勞會使軋輪變得較粗糙。Sano⁽³⁾ 認為太大的軋延力和太高的軋延溫度都會使軋輪表面受到損傷，雖然其機構不明確，但是 Luyckx 和 Lorang⁽⁴⁾ 研究顯示太高的軋延溫度產生的銹皮塑性太大，易使熱軋鋼捲產生斑點銹皮(Fleck Scale)。Funke 等人⁽⁵⁾ 亦認為太高的軋延溫度會增加銹皮的塑性而產生波浪狀的二次軋入銹皮。Severdenko 等人⁽⁶⁾ 認為銹皮的硬度和黏附性在熱軋中是影響銹皮滲入底材的兩個最重要特性，當銹皮硬度比底材大時，銹皮會被軋入底材內，Mukhin 等人⁽⁷⁾ 後來在研究汽車用鋼片的軋入銹皮缺陷時亦有此種說法。Nishimura 等人⁽⁸⁾ 認為流星狀和散砂狀表面缺陷是因受到傷害的軋輪表面的不規則性複印在鋼捲表面上，然後把表面較凸起部位的銹皮在下一道軋延時軋入。Qike 等人⁽⁹⁾ 統計顯示，含 Nb 熱軋鋼捲在上游粗軋輸送溫度愈高，則完軋鋼捲的表面缺陷發生率也愈高。近年來，日本亦有人⁽¹⁰⁾ 在實驗室試驗，顯示極低碳鋼軋延溫度愈高，因冷卻時熱應力愈大，銹皮龜裂的長度也愈長，尤其在 950°C 以上更顯著。綜合上述文獻相關資料，吾人可知熱軋鋼捲軋延溫度愈高，對完軋鋼

捲的表面品質愈不好，為瞭解造成表面品質不好是否與高溫氧化銹皮的特性有直接的關係，故進行實驗室模擬氧化研究。

此外，即使不發生軋入銹皮，熱軋鋼材在完軋後，經高溫冷卻到室溫，生成銹皮是不可避免的，完軋鋼材在內儲時就是靠這種銹皮的保護來防止生銹。如果內儲時產生點狀銹蝕，就易造成用料困擾，尤其是汽車用鋼。發生銹蝕時務必先研磨銹蝕處理，所以本文也針對熱軋鋼捲易銹的問題進行完軋鋼捲氧化銹皮研究，以瞭解易銹之原因。

二、研究方法

本研究之實驗流程如圖 1 所示，其方法茲分述如下：

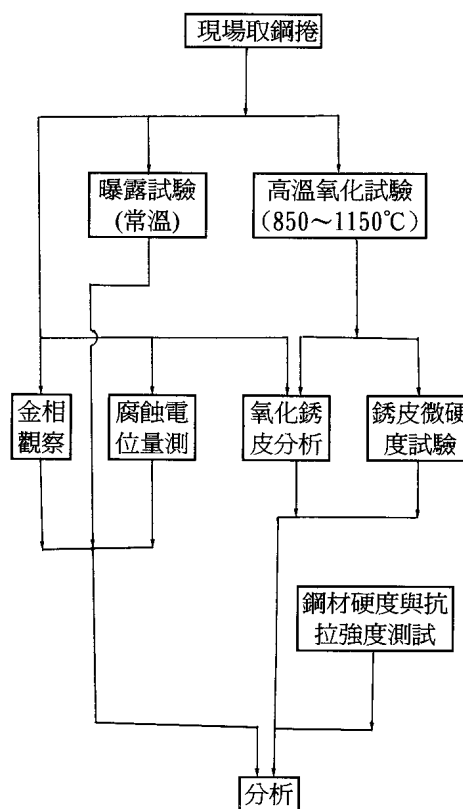


圖 1 本研究之實驗流程圖

Fig.1 The experimental schematic of the present study.

表 1 試驗鋼材的化學成份

Table 1 Chemical compositions of the test steels.

元素 鋼料	C	Si	Mn	P	S	Al	N
高溫氧化試片	.050	.010	.35	.014	.007	-	.004
甲鋼料	.048	.017	.30	.012	.009	.032	.004
乙鋼料	.040	.016	.33	.014	.007	.055	.005

Unit : wt%

Balance : Fe

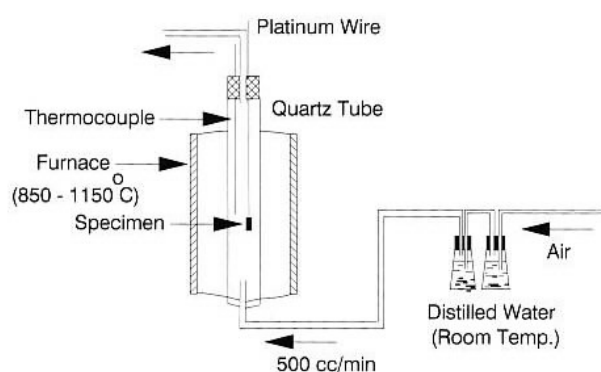


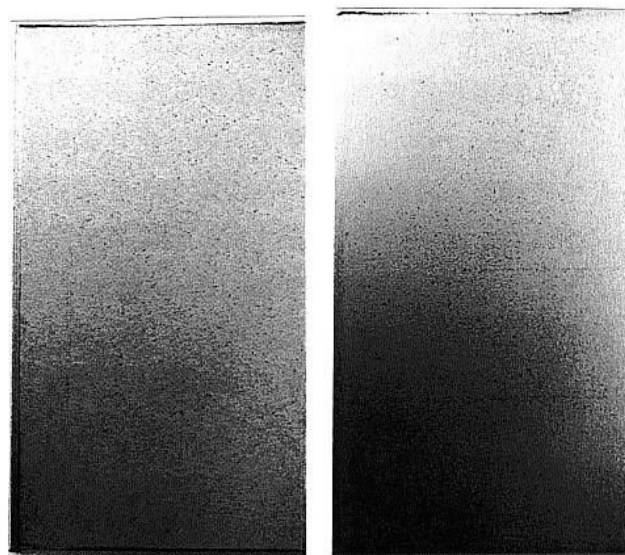
圖 2 實驗室高溫氧化試驗裝置示意圖

Fig.2 The schematic of the high temperature oxidation study in laboratory.

2.1 高溫氧化試驗

從現場取 4 mm 厚之熱軋鋼捲，其成分如表 1 所示，將表面氧化銹皮磨除，裁成 30 mm x 50 mm x 厚度之試片進行如圖 2 所示之實驗室高溫氧化試驗。溫度是 850 ~ 1150 °C，以模擬現場從粗軋至完軋之氧化氣氛，氧化時間是 5 分鐘，以獲得足夠之可量測的銹皮。試片在氬氣保護性氣氛中從常溫升至所設定之溫度後，改通氧化氣體，完成氧化後以蒸餾水淬至常溫。

2.2 曝露試驗



(a) 甲鋼料

(b) 乙鋼料

圖 3 曝露試驗前之試片外觀

Fig.3 Morphology of the specimens before the indoor exposure test.

包括甲鋼廠和乙鋼廠所提供之熱軋完軋鋼捲，底材化學成分亦列於表 1，顯示兩種材質成分都相近，厚度則都是 2.5 ± 0.1 mm。將鋼料裁成 50 mm x 90 mm x 厚度之試片，懸掛於中鋼公司耐蝕產品研究室實驗室內，試驗前典型的試片外觀如圖 3 所示。

2.3 銹皮微硬度試驗

將上述高溫氧化水淬所得含殘留銹皮之試片以吹風機烘乾，剖面機械拋光至 $0.05 \mu\text{m}$ Al_2O_3 ，用光學顯微鏡觀察殘留銹皮的微組織，結合 Matsuzawa MXT 50 微硬度試驗機測試其微硬度。

2.4 鋼材硬度與抗拉強度試驗

將高溫氧化試驗用之鋼種材質製成如圖 4 所示之拉伸試驗試片，磨除表面的氧化銹皮，以 MTS 458 高溫拉力試驗機測試抗拉強度，溫度

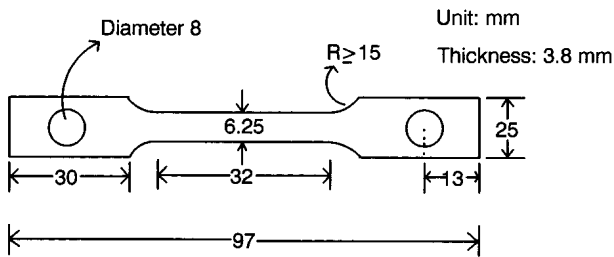


圖 4 常溫及高溫拉伸試驗試片圖

Fig.4 The schematic of the room temperature and high temperature tensile test specimen.

是常溫至 900 °C。另外，取抗拉強度值已知的他鋼種材質以 #1200 砂紙機械拋光，用 Matsuzawa DVK-1 維氏硬度機測試硬度，以求硬度與抗拉強度之關係，做為預測金屬底材之高溫硬度的資料。

2.5 氧化銹皮分析

含上述高溫氧化水淬烘乾所得之銹皮與甲、乙鋼料完軋鋼捲之銹皮，將銹皮磨成粉末，以 X 光繞射儀(Siemens 500D)做繞射分析(Co 靶 K_α , $\lambda = 0.17889 \text{ \AA}$)，以鑑定氧化銹皮的種類，並以戴薛氏技術(Debye-Scherrer) 將圖樣攝下分析。

2.6 金相觀察

包括光學顯微鏡(Leitz)和掃描式電子顯微鏡 SEM (JSM-6300)，試片包括甲、乙鋼料曝露試驗前和試驗後，觀察剖面銹皮和底材之微組織結構。製作方式是將試片剖面機械拋光至 $0.05 \mu\text{m Al}_2\text{O}_3$ ，以 3% Nital 做浸蝕(Etching)，SEM 試片則再鍍金以利導電。另外，腐蝕後之試片表面亦以 SEM 結合能量分光儀(EDS) 作元素分佈分析，以瞭解有無附著物致銹之跡象。

2.7 腐蝕電位量測

將甲、乙鋼料完軋鋼捲裁成電化學試片，以

表 2 高溫氧化銹皮之微硬度測試結果

Table 2 Test results of the microhardness of the oxide scales from high temperature oxidation.

氧化溫度	850°C	950°C	1050°C	1150°C
Hv	307±34	414±22	454±17	507±32

註：各數據為測試五次之平均值。

表 3 實驗室高溫氧化水淬所得之銹皮的 X 光繞射分析結果

Table 3 Results of X-ray diffraction analyses of the oxide scales from high temperature oxidation in laboratory followed by quenching in water.

氧化溫度	主要組成	次要組成
850°C	FeO	-
950°C	FeO	Fe ₃ O ₄
1050°C	FeO	Fe ₃ O ₄
1150°C	Fe ₃ O ₄	FeO, Fe ₂ O ₃

電位儀量測腐蝕電位隨時間變化曲線，腐蝕液為 3.5% NaCl，溫度為常溫。

三、實驗結果與討論

3.1 銹皮/底材硬度比

表 2 為實驗室高溫氧化水淬之殘留銹皮的微硬度試驗結果，顯示氧化溫度愈高，所得之銹皮的硬度愈大。表 3 為高溫氧化水淬所得之銹皮 X 光繞射分析結果，與表 2 不同處是表 3 為總銹皮(含水淬剝落之銹皮與殘留銹皮)，而表 2 僅是殘留銹皮之微硬度。由表 3 可看出在不同溫度氧化，銹皮的組成不同，850 °C 銹皮的組成祇有 FeO，950 °C 主要組成是 FeO，次要組成是 Fe₃O₄，1050 °C 主要組成和次要組成亦分別是 FeO 和 Fe₃O₄，1150 °C 主要組成則是 Fe₃O₄，次要組成有 FeO 和 Fe₂O₃，此結果與文獻⁽¹¹⁾ 相符，意即如圖 5 所示，氧化溫度在 850 °C ~ 1150 °C，銹皮的組成中，FeO 隨溫度之升

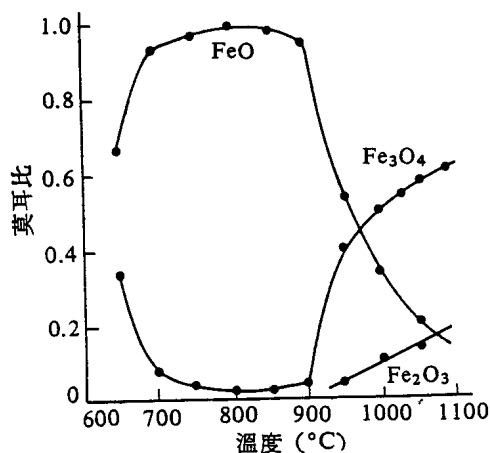


圖 5 鐵在一大氣壓氧氣中生成銹皮組成與氧化溫度之關係⁽¹¹⁾

Fig.5 The relationship between the scale composition and the oxidation temperature of iron in oxygen at one atmosphere⁽¹¹⁾

高而降低， Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 則隨溫度之升高而增加。雖然圖 5 祇是在 1 大氣壓氧氣中的氧化銹皮，實際熱軋場中是空氣+水蒸氣的氧化，但其對銹皮組成的影響甚微⁽¹¹⁾，故圖 5 仍可作為銹皮組成之參考。另表 2 與表 3 銹皮的取得是出爐後立刻從高溫水淬，再烘乾，故常溫所分析的銹皮應和高溫相近，不會有類似 $4\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \alpha\text{-Fe}$ 之轉換發生⁽¹²⁾。依 Williams 和 Boxall⁽¹¹⁾ 量測的數據， FeO 之硬度為 270 ~ 350 Hv， Fe_3O_4 為 420 ~ 500 Hv， Fe_2O_3 為 1030 Hv。比較表 2 和表 3，可看出 850 °C 之氧化銹皮硬度最低，故應全是 FeO ；950 °C 和 1050 °C 之硬度應含 FeO 和 Fe_3O_4 兩種組成，但 FeO 仍為主要銹皮；至於 1150 °C，部份銹皮在水淬中脫落後，殘留銹皮仍是以 Fe_3O_4 為主，以致雖然 X 光繞射顯示全部銹皮以 Fe_3O_4 為主， FeO 和 Fe_2O_3 為次要組成，但其硬度仍比 1050 °C 者高。

圖 6 是此鋼種之抗拉強度與測試溫度之關係曲線(實線部份)與其可能之外插曲線(虛線部份)。由該圖可預測在 850 °C ~ 1150 °C 之抗拉

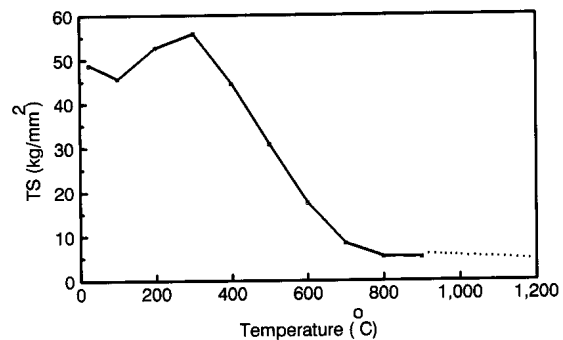


圖 6 高溫氧化試片之鋼種的抗拉強度與測試溫度之關係曲線(實線部份)與其可能之外插曲線(虛線部份)

Fig.6 The relationship between the tensile strength and the test temperature of the steel for high temperature oxidation(solid line)and the possible extrapolated line(dotted line).

強度值，雖然此項測試所製成的拉伸試片並不是標準試片，但其結果祇會影響伸長率，不會影響降伏強度和抗拉強度的值。圖 7 是已知強度及他鋼種材質其抗拉強度與硬度之關係圖，抗拉強度愈高之鋼材硬度當然也愈大，經以一次線性迴歸所得之計算式，配合本研究如圖 6 所示之高溫拉伸試驗結果換算得本鋼材在 850 °C ~ 1150 °C 之硬度，再由此硬度與表 2 之銹皮微硬度可求銹皮和底材在高溫的硬度之比，其結果如表 4 所示，顯示銹皮/底材硬度比隨氧化溫度之升高而增大。

現場實際軋延顯示，軋延溫度愈低，即銹皮/底材之硬度比愈低時，二、三次軋入銹皮剔退率也愈低，與本文所得之高溫銹皮特性結果相符。

如前言所述，熱軋鋼捲軋延溫度愈高，對完軋鋼捲的表面品質愈不好。本文中，軋延溫度太高導致軋輪的傷害無法在實驗室中證實。但表 3 之結果顯示 850 °C ~ 1050 °C 之氧化物的主要組成雖然都含有 FeO ，但在 1150 °C， FeO 祇是次要組成，主要組成是 Fe_3O_4 ，依文獻記載

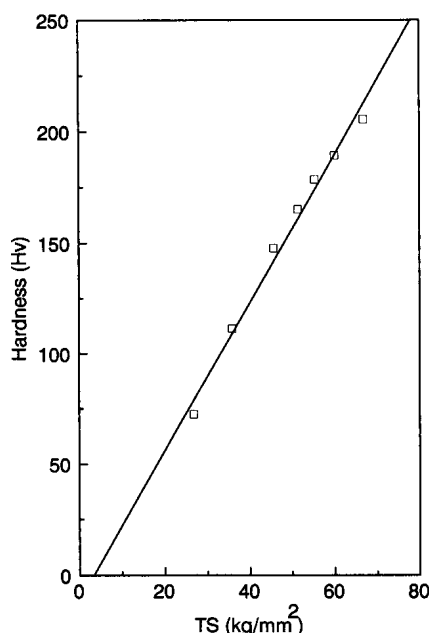


圖 7 抗拉強度已知之他種鋼材的硬度測試結果
Fig.7 The hardness test results of other steels with known tensile strength.

⁽¹³⁾，FeO 在高溫具有比 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 更高的塑性，而現場精軋進口溫度的提高也會使二次軋入銹皮提高，故 Luyckx 等人^(4,5) 所言軋延溫度太高使銹皮塑性太大而造成軋入銹皮所扮演的角色並不大。至於 Severdenko 等人⁽⁶⁾ 和 Mukhin 等人⁽⁷⁾ 所談的硬度問題，如上所述，三種氧化鐵中，FeO 最軟， Fe_3O_4 次之， Fe_2O_3 最硬，依另一文獻的記載⁽¹⁴⁾，FeO 最軟， Fe_2O_3 次之， Fe_3O_4 最硬（雖然其中未提供數據），但 FeO 為最軟之氧化鐵應是不爭的事實。本文中，氧化溫度愈高，FeO 含量愈少，以致銹皮之硬度愈大，雖然表 2 祇是銹皮在常溫之硬度，但是如前所述，在高溫 FeO 的塑性比 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 更高⁽¹³⁾，硬度的下降應比 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 快，所以銹皮硬度更會隨氧化溫度之提高而增大（祇要氧化銹皮的種類在水淬過程中並未改變）。反之，金屬底材之硬度則隨氧化溫度之提

表 4 高溫氧化銹皮與底材之硬度的比值之近似值
Table 4 The hardness ratio of the oxide scale to the substrate.

氧化溫度	850°C	950°C	1050°C	1150°C
比值	56	78	86	96

高而下降，因此氧化溫度愈高，銹皮和底材硬度的比值愈大，在軋延過程中愈容易被軋入底材而造成軋入銹皮，與 Severdenko 等人⁽⁶⁾ 之說法相符。至於他們認為銹皮和底材硬度的比值 ≥ 1 時，銹皮會被軋入底材內，於本研究如表 4 所見，銹皮/底材硬度的比值均比 1 甚大，乃是因本文中，表 2 所得數據為常溫銹皮硬度，實際高溫之硬度並沒這麼高，以 FeO 為例，從常溫升至 850°C 時，硬度約減少了 20 倍，升至 1000°C 時，約減少了 40 倍⁽¹⁵⁾，故銹皮/底材硬度的比值應會甚小於表 4 所列之數據。

3.2 完軋鋼捲之致銹性

由於熱軋鋼捲在高溫生成的銹皮都必須在精軋前全部去除（否則將產生軋入銹皮），所以完軋鋼捲的氧化銹皮祇是完軋以後所產生者，故完軋溫度和完軋後的冷卻速率對銹皮的特性之影響扮演很重要的角色。

經曝露試驗後之銹皮外觀如圖 8 所示，顯示甲鋼料有嚴重的點狀銹蝕，乙鋼料則無。

甲、乙鋼料完軋鋼材未進行腐蝕試驗前氧化銹皮之 X 光繞射分析結果如表 5 所示。顯示甲鋼料銹皮的主要組成含 Fe_3O_4 ，次要組成含 FeO，乙鋼料主要組成亦含 Fe_3O_4 ，但次要組成則不含 FeO，顯示甲鋼料有比乙鋼料更易產生 FeO 組成之趨勢。至於 $\alpha\text{-Fe}$ ，因各鋼料氧化銹皮都很薄，在取樣做 X 光繞射時難免刮到底材，所以無法判定表 5 中的 $\alpha\text{-Fe}$ 是來自底材或是來自氧化銹皮中 FeO 轉換成 Fe_3O_4 時所

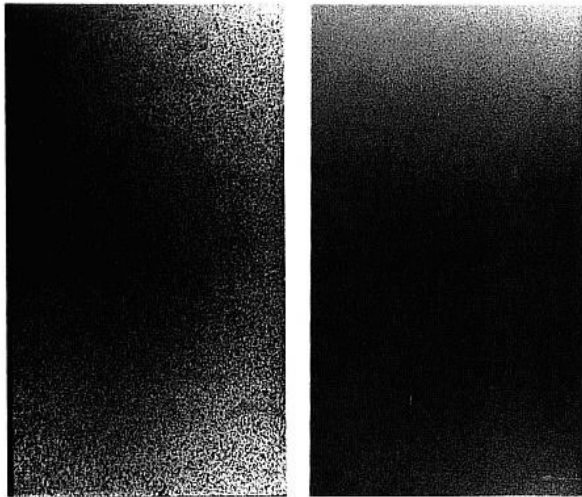


圖 8 曝露試驗 87 天後之試片外觀

Fig.8 Morphology of the specimens after the indoor exposure test for 87 days.

表 5 完軋鋼材氧化銹皮的 X 光繞射分析結果

Table 5 Results of X-ray diffraction analyses of the oxide scales of as-rolled steels.

鋼 料	主要組成	次要組成
甲鋼料	Fe_3O_4 , $\alpha\text{-Fe}$	FeO
乙鋼料	Fe_3O_4 , $\alpha\text{-Fe}$	-

產生的 $\alpha\text{-Fe}^{(12)}$ 。

圖 9 是腐蝕電位隨量測時間變化曲線，顯示兩種鋼料腐蝕電位都隨時間而下降，最後達到一穩定值。穩定值愈低之鋼料表示其底材之耐蝕性愈差，而初始(前 18 分鐘)腐蝕電位下降愈快之鋼料表示其銹皮孔隙愈多，以致腐蝕液容易滲入銹皮內部⁽¹⁶⁾。故圖 9 顯示了甲鋼料的銹皮孔隙比乙鋼料多。

針對完軋鋼材但未進行腐蝕試驗之鋼料，依 ASTM E112 之規定量測得之晶粒尺度，甲鋼料為 $13.3\ \mu\text{m}$ ，乙鋼料為 $16.9\ \mu\text{m}$ 。由於兩種鋼料的化學成分和完軋厚度都相近，故可推測甲鋼料在完軋後冷卻速率應比乙鋼料快，以致 Ar_3 較低，產生之肥粒鐵晶粒較細。

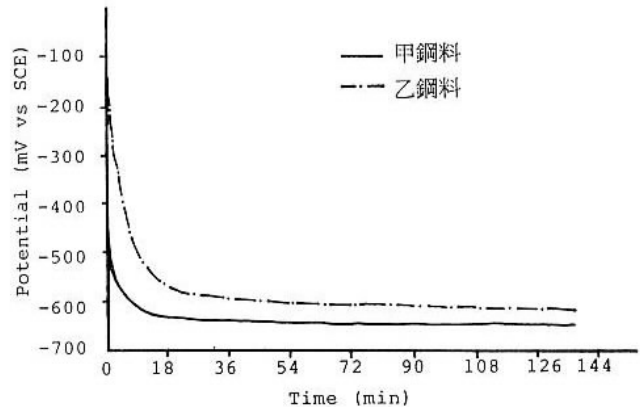
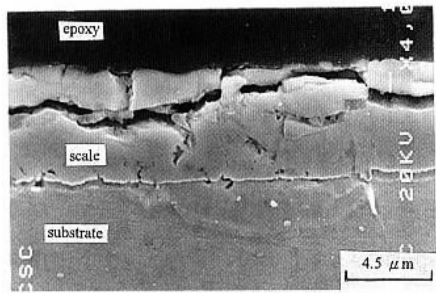


圖 9 完軋鋼材腐蝕電位隨時間變化曲線

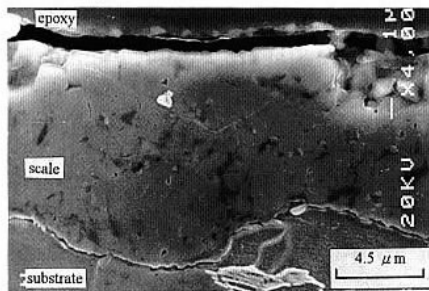
Fig.9 Curves of corrosion potential vs time of the as-rolled steels.

腐蝕試驗後試片之 SEM/EDS 分列於圖 10 ~ 12。圖 10 顯示完軋鋼材曝露試驗前，乙鋼料氧化銹皮比甲鋼料厚。圖 11(a) 為甲鋼料曝露試驗後試片正面之微組織，中間有一個白色區是點狀銹蝕；兩個 "X" 間元素線掃描如圖 11(b) 所示，點銹處含較高的 S 和 O，較低的 Fe。顯示點銹應含有硫化物和氧化物，S 和 O 應是來自空氣中，但點銹四周無其他元素富集，其他的點銹處亦有類似結果。意即點銹處有硫化物和氧化物，點銹四周則無其他元素富集。圖 12 為甲鋼料於曝露試驗後銹皮之剖面 SEM 照片，顯示甲鋼料經試驗後銹皮有龜裂的現象，意即孔隙在腐蝕過程中扮演重要的角色，而非祇是銹皮外表面與腐蝕性氣氛反應。是由於氣體分子經由孔隙向內擴散，以致造成銹皮龜裂，而非氣體離子經由銹皮本身向內擴散⁽¹²⁾。

早在 1970 年，Thilakan 等人⁽¹⁶⁾ 進行過銹皮的特性對大氣曝露生銹的影響，其結果顯示在熱軋製程中，完軋溫度愈高，生成的銹皮愈厚，耐蝕性愈好。在本研究中，雖然乙鋼料氧化銹皮比甲鋼料厚，但如圖 11 及 12 之 SEM/EDS 分析顯示，致銹因子不是附著在銹皮表面的污染物，而是銹皮內的孔隙。因此如圖 9 所見，腐



(a)甲鋼料



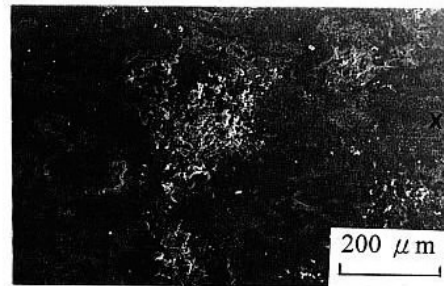
(b)乙鋼料

圖 10 完軋鋼材未曝露試驗前之剖面銹皮的 SEM 影像

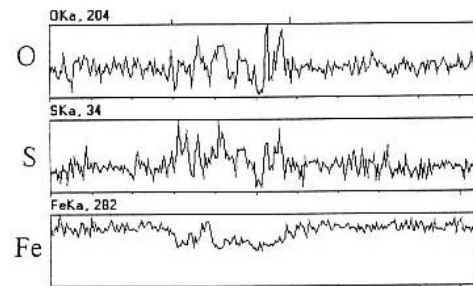
Fig.10 SEM micrographs of the section view of the as-rolled steels before the indoor exposure test.

蝕電位量測顯示甲鋼料的銹皮孔隙比乙鋼料多，造成如圖 8 所見之曝露試驗結果。反觀 Thilakan 等人⁽¹⁶⁾之腐蝕電位量測，其銹皮較薄之鋼料亦顯示銹皮之孔隙較多，故其致銹的主因也應該是孔隙，而不是銹皮厚度。

至於孔隙的成因，則應從氧化和冷卻所產生的應力探討^(13,17,18)，鐵氧化物的 P-B 比值(氧化物和被氧化之金屬體積比) > 1 ，此應力應是壓縮應力，從晶粒尺度之比較，可看出甲鋼料在完軋後的冷卻速率應比乙鋼料快，以致冷卻應力造成銹皮產生孔隙。此外，由於甲鋼料冷速較快，鋼材處在高溫的時間較短，故銹皮比乙鋼料薄且在高温產生的 FeO 較不易轉換成 Fe_3O_4 ⁽¹²⁾，故本研究中 X 光繞射顯示甲鋼料銹皮含有微量之 FeO，乙鋼料則完全沒有 FeO 組成。



(a)SEM 影像



(b)兩個“X”間的 EDS 線掃描

圖 11 甲鋼料曝露試驗後之正面銹皮的 SEM / EDS 分析結果。

Fig.11 SEM / EMD test result of the top view scale of Steel A after the indoor exposure test.

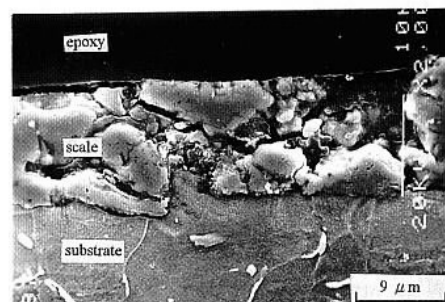


圖 12 甲鋼料曝露試驗後之剖面銹皮 SEM 影像

Fig.12 SEM micrographs of the section view of Steel A after the indoor exposure test.

五、結論

實驗室 850 ~ 1150 °C 氧化溫度愈高，生成銹皮的 FeO 含量愈少， Fe_3O_4 含量愈多，銹皮硬度愈大，銹皮和底材硬度的比值也更大，較容易被軋入底材而造成軋入銹皮。現場軋延亦顯示若粗軋至完軋之溫度愈低，則二次和三次軋入銹皮剔退率也下降。

對於完軋鋼捲的內儲致銹性，若銹皮含較多的孔隙，則外界腐蝕性氣氛較易經由孔隙滲透進入銹皮內部與底材反應，因而較易腐蝕。

參考文獻

1. R. V. Williams and G. M. Boxall; JISI, 203, No.4, (1965) 369.
2. P.J.Horvath; "Relation between Roll Surface Breakdown and Scale Formation", Mechanical Working & Steel Processing X VIII, AIME (1980) 238.
3. Y.Sano; Proc. of the 81st Symp. for the Technology of Plasticity, JSTP, Tokyo, (1982) 1.
4. L.Luyckx and F.Lorang; CNRM, No.2, Jan. (1965) 3, translated in BISI 4107.
5. P.Funke, R.Kulbrok, and H.Wladika; Stahl Eisen, vol. 92, No.22, Oct. (1972) 1113. translated in BISI 10952
6. V.P.Severdenko, E.B.Lochechnikov, and M.A. Baek; "Scale in Hot Mechanical Working of Metals", Metallurgiya, (1977) 208.
7. Y.A.Mukhin, A.P.Shapovalov, H.A.Bobrov, I. A.Shamash, and V.G.Ermolaev; Steel USSR, vol.15, Apr. (1985) 179.
8. K.Nishimura, E.Yoneda, T.Ebine, A.Mizuta and H.Ibata; Proc. of the Technical Meeting in the 1988 Japanese Spring Conf. for the Technology of Plasticity, JSTP, Tokyo, (1988) 27.
9. Y.Qike, J.Sato, K.Minami, K.Yoshitake, and S.Yamanaka; ISIJ International, vol.32, No.11, (1992) 1211.
10. 住永知毅、竹谷昭彦、足立明夫、松本正次、川島浩治、金成昌平; "Prevention of Rolled-in-scale Problems in Ultra Low Carbon Steel", CAMP-ISIJ, vol.6, (1993) 1328.
11. 富永治朗、協本欣也、森俊道、村上雅昭、吉村隆文; 製鐵研究, 303, (1980) 13603.
12. Y.N.Chang and F.I.Wei; J.Mat'ls Sci., vol.24 No.1, (1989) 14.
13. P.Hancock and R.C.Hurst, "The Mechanical Properties and Breakdown of Surface Oxide Film at Elevated Temperature", in "Advances in Corrosion Sci. & Technol.", ed. M.G.Fontana & R.W.Staehle, Vol.4, Plenum Press, New York, (1974) 1.
14. J.Wingrove; JISI, vol.208, March, (1970) 258.
15. H.Okada; "Scale Formation Mechanism during Hot Strip Rolling and Hydraulic Descaling Technology", 第 17 屆中日工程技術研討會鋼鐵組, 台灣高雄, (1996) 1-1.
16. H.R.Thilakan, A.K.Lahiri, and Banerje, Indian J. Technol., vol.8, Sept. (1970) 351.
17. S.Taniguchi and D.L.Carpenter, Trans. ISIJ, vol.18, (1978) 530.
18. T.E.Mitchell, D.A.Voss, and E.P.Butler, J. Mat'ls Sci., vol.17, No.6 (1982) 1825.