

# 鋼胚熱軋製程加入側導板之有限元素分析

## Finite Element Analysis on Hot Rolling of Steel Slab with Side Guide

敖仲寧<sup>1</sup>, 陳明發<sup>2</sup>, 何昆霖<sup>3</sup>, 謝銘峰<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中正大學機械學系教授

<sup>2</sup>中國鋼鐵股份有限公司鋼鋁研發處副研究員

<sup>3,4</sup>中正大學機械學系研究生

### 摘要

在熱軋製程中鋼胚會經過數次的平軋來裁減厚度以及邊軋來修整寬度。由於現場加熱爐設置於熱軋線的側面，導致鋼胚在出爐後寬度方向有溫度梯度的現象，經過側壓裁寬製程後鋼胚出現縱向彎曲現象，再經過後續多次平軋製程後縱向彎曲現象會更加明顯，為了修正縱向彎曲現象，在熱軋現場中以一對可動之側導板置於各道次前後，當鋼胚經過各道次軋軋後，兩側側導板移動至預定寬度位置固定，使鋼胚受側導板之引導而前進同時校正鋼胚縱向彎曲量。本研究利用有限元素軟體 ABAQUS 依照實際熱軋現場建立輸送過程的熱傳模型、後續平軋模型及側導板模型，考慮現場實際邊界條件模擬側導板對鋼胚縱向彎曲現象之影響並分析其它可能影響縱向彎曲之因素，找出最佳修正縱向彎曲和橫截面不對稱的製程參數以提高熱軋品質。

**關鍵字：**側導板、縱向彎曲、熱軋、平軋、有限元素法

### ABSTRACT

In hot rolling press, the slab thickness is gradually reduced by horizontal rolling and the slab width is reduced by sizing press. Temperature gradient along the width of the slab is not avoidable due to the fact that the furnace is located beside the hot rolling line. With the presence of temperature gradient, camber phenomenon occurs on the slab after sizing press process. The camber phenomenon becomes more serious after the horizontal roll process. To overcome this problem, a pair of side guides are introduced to overcome the camber phenomenon. Finite element analysis using ABAQUS was applied to simulate the sizing press process and the subsequent horizontal rolling process with side guide to duplicate camber and wedge phenomena. Boundary conditions of analysis were defined based on actual geometrical, thermal and mechanical conditions of the process. The effect of side guides on the camber and wedge of steel slab was systematically investigated through the results obtained from FE analysis.

**Key word :** side guide, camber, wedge, hot rolling, flat rolling, finite element analysis.

### 一、緒論

傳統熱軋延加工(Rolling)是使材料在高溫的狀態下，藉由軋輪和材料之間的磨擦力將材料引入兩個轉動方向相反的軋輪之間，用以改變材料厚度、寬度或加工成不同截面形狀，加工過程材料持續產生塑性變

形，適用於大量生產的塑性加工方式。為目前金屬成形加工中最廣泛應用的塑性加工法之一。

由於熱軋工場加熱爐設置位置的關係造成鋼胚在開始進行軋軋前寬度方向有溫度梯度現象，鋼胚在寬度方向有溫度梯度的情形下經過側壓裁寬製程(Sizing Press)後會

產生縱向彎曲現象(Camber)，再經過多道次平軋後鋼胚縱向彎曲現象會更加嚴重。為了修正縱向彎曲現象，在熱軋現場中是以一對可動之側導板(Side Guide)置於各道次前後，當鋼胚經過各道次軋軋後，兩側側導板移動至預定寬度位置固定，使鋼胚受側導板之引導而前進同時校正鋼胚縱向彎曲量。

在鋼帶的生產線上存在許多的變數會影響到生產的效率以及鋼帶成品的品質，若要對生產線上的半成品進行量測，則必須停止生產線並將鋼胚退出生產線以便進行觀察，但如此不僅造成材料的浪費也會影響到生產線的運作而造成耗費巨大的成本。

有限元素法可以應用於針對不同製程參數進行不同階段的熱軋製程探討，分析的計算結果包括輪廓外型還有應力應變及溫度分布等結果，而且有限元素法的高速性和可靠性可以針對熱軋製程中不易進行實驗的問題進行研究，且可以節省實驗及結果量測的成本。

## 二、文獻回顧

### 2.1 側壓裁寬製程相關研究

側壓裁寬製程在較大裁減量情況下可能會產生塑性挫曲，苗潤濤[1]針對寶鋼實際製程做研究，實驗結果可以歸納出寬度1400mm的鋼胚當裁寬量小於200mm時，塑性挫曲的現象不會發生，而當裁減量大於200mm時隨著裁減量的增加，塑性挫曲的情況也更愈嚴重。Yamaguchi[2]等人說明鋼胚軋延之後邊緣缺陷產生是必然的現象，鋼胚經過第一道次邊軋後邊緣會有褶痕(Crease)的產生，再經過中間道次之後，褶痕會往鋼胚之中心移動，此研究將立軋軋裁寬改為側壓裁寬壓力機比較缺陷生成情形。D.C. Ko[3]等針對側壓裁寬製程中的鍛錘加以設計，藉由改變鍛錘的幾何外型找出可以得到鍛錘最小鍛壓力、鋼胚橫截面厚度雙鼓現象差異最小以及產生最少的邊緣缺陷的鍛錘幾何參數。

紀武興[4]用有限元素軟體 ABAQUS 模擬二維鋼板熱軋情形，模擬結果鋼胚在經過邊軋與平軋延後雙鼓區域剪應力最大，此區域為熱軋後最常出現缺陷的部分，因此依據最大剪應力準則定義缺陷生成位置。高裕倫[5]以 Gleeble 鍛粗試驗機進行高溫壓縮實

驗求得材料應力應變曲線，根據實際條件模擬鋼胚三維邊軋及平軋結果，其模擬邊軋結果變形集中於寬度兩側，最大剪應力區域與實際缺陷生成位置相似，並且指出在總裁減量相同情況下減少軋延道次可以減少缺陷產生。徐星杓[6]根據實際側壓裁寬製程條件進行模擬，鋼胚經過邊軋後變形集中於鋼胚寬度兩側，以側壓裁寬結果變形較均勻，裁寬後鋼胚上下表面輪廓呈現波浪狀，等效塑性應變呈現間斷式分佈，但分析中鋼胚假設為四分之一對稱，由於挫曲產生時鋼胚上下變形並非對稱，模擬結果中沒有挫曲現象產生。官正邦[7]分析中鋼胚採用為全模型，成功模擬頭端塑性挫曲情形，並且分析鋼胚經過側壓裁寬製程及後續一道次水平軋軋，分析結果最大剪應力分佈於鋼胚寬度兩側，此區域為缺陷最易生成的部分。

### 2.2 鋼胚縱向彎曲現象相關研究

游宗翰[8]依照熱軋現場實際情況修改側壓裁寬壓力機模型及建立後續軋軋模型，探討計算結果準確性，並且對鋼胚溫度不對稱問題進行初步分析，探討鋼胚縱向彎曲現象以及修正的方式。胡賢磊[9]等人分析了造成鋼胚縱向彎曲的原因，包含了鋼胚橫截面不對稱、鋼胚寬度方向溫度分佈不均、鋼胚偏移粗軋軋中心、軋軋軋形以及軋軋兩側剛度上的差異，而溫度分佈不均和軋軋外形影響縱向彎曲最為嚴重。何昆霖[10]分析鋼胚進入側壓裁寬壓力機時第一道次的咬入位置不同對鋼胚縱向彎曲量之影響，並利用各平軋機上軋輪傾斜角度來修正鋼胚縱向彎曲現象。由現場熱軋現場所提供的實際經驗得知一號平軋機上軋輪傾斜角度對於修正鋼胚縱向彎曲現象效果並不明顯。為了修正縱向彎曲現象，在模型中將一對側導板置於各道次前後，當鋼胚經過各道次軋軋後，兩側側導板移動至預定寬度位置固定，使鋼胚受側導板之引導而前進同時校正鋼胚縱向彎曲量。並分析軋軋時側導板對鋼胚縱向彎曲及橫截面不對稱現象之影響。

## 三、有限元素模型

### 3.1 熱軋加工模型

在熱軋模型中分為輸送過程的熱傳模擬和裁減過程的力學模型，而輸送過程的熱

傳模型使用隱式積分分析，由於側壓裁寬製程過程中鋼胚同時和鍛錘及輸送輥接觸，在接觸面較多的情況下使用顯示積分。實際鋼胚長度大約 8000mm，分析中鋼胚縮短為 3500mm，鋼胚頭端、尾端和寬度兩側的元素有局部細化，使用元素名稱為 C3D8RT[5]，鋼胚初始溫度為 1190°C。

在鋼胚出爐後有很多熱傳因素會影響鋼胚裁減，所以需要建立粗軋區各階段的熱傳模型，如圖 1 所示，希望能模擬出準確的溫度變化。鋼胚為一長方六面體，六個表面皆與大氣接觸，所以皆會與空氣產生輻射熱損失及熱對流，而鋼胚下表面與輸送輥會產生接觸熱傳導，而各階段有不同的高壓噴水除鏽設定，而環境溫度皆為 45°C。表 1 及表 2 為鋼胚的熱傳係數。

### 3.2 側壓裁寬製程製程前之熱傳模擬

現場實際情形鋼胚寬度兩側的溫度差大約在 20°C 到 25°C 之間。此節鋼胚尺寸長度、厚度、寬度分別為 3500mm、250mm、1420mm，所以在此假設鋼胚兩側溫度相差 24°C，相當於寬度方向溫度梯度 0.0169°C/mm，圖 2 為鋼胚在進行側壓裁寬前的溫度分佈，最高溫度維持在 1189°C 而邊緣角落則有最低溫度為 925°C，因為未知的環境溫度假設為 45°C 與實際現場應有差異，未來將從溫度分佈之實際條件進一步改善模型準確性。

### 3.3 側壓裁寬壓力機及後續邊軋平軋模型

圖 3 為熱軋鋼帶粗軋區及精軋區加工流程圖，而側壓裁寬壓力機簡稱 SSP，一號平軋機簡稱 R1，二號平軋機簡稱 R2 以此類推，二號邊軋機簡稱 VR2，三號邊軋機簡稱 VR3 以此類推，而一號精軋機到七號精軋機簡稱 F1-F7。圖 4 為側壓裁寬壓力機模型，圖 5 為一號平軋機模型示意圖，圖 6 為一號平軋機咬入端有側導板模型示意圖，圖 7 為一號平軋機兩端皆有側導板模型示意圖，圖 8 為二號平軋機及二號邊軋機兩端有側導板模型示意圖，分析使用熱機耦合模式而使用軟體預設的 90% 應變能轉為熱能，在進行側壓裁寬製程模擬時鋼胚有利用適應性網格重建法(Adaptive remeshing)來控制網格的變形。

### 3.4 縱向彎曲量定義

圖 9 為鋼胚縱向彎曲示意圖(上視圖)，圖中(1)是鋼胚裁減前中心線，鋼胚產生縱向彎曲時中心線也會跟著彎曲，所以稱為縱向彎曲線。圖中(2)是鋼胚頭端及尾端原始寬度中心點連成的直線，則稱為中心線。縱向彎曲量的定義為裁減後線(1)和線(2)的最大偏移距離。

## 四、結果與討論

由先前研究中發現鋼胚在經過側壓裁寬壓力機時若第一道次裁減咬入量較深，裁寬後鋼胚之縱向彎曲量較小，為 10.9mm。故選擇經側壓裁寬壓力機第一道次咬入位置較深之裁寬模型為結果檔，接續一號平軋機有無 Side Guide 之模型比較。

### 4.1 一號平軋機加入側導板修正縱向彎曲分析

此節則探討在一號平軋機前後加入側導板後是否可有效修正鋼胚之縱向彎曲量，現將比較平軋機無側導板、平軋機咬入端有側導板及平軋機兩端皆有側導板三者對鋼胚之影響。由圖 10 中可看到鋼胚在經過平軋機時碰撞側導板使之產生較高應力，可能導致縱向彎曲量有所變化。圖 11 為鋼胚經過平軋機咬入端設置側導板後之應力分布上視圖，可發現輥軋後在鋼胚頭端及兩側有較高應力產生。圖 12 為鋼胚經過平軋機兩端皆有側導板後之應力分布圖，由於鋼胚在輥軋後碰撞側導板使其頭端應力值略提高。

鋼胚經過平軋機無側導板後縱向彎曲量增至 24.7mm，而鋼胚經過平軋機咬入端有側導板後縱向彎曲量增至 24.8mm，鋼胚經過平軋機兩端皆有側導板後縱向彎曲量增至 23.6mm。比較三種有無側導板模型輥軋後的鋼胚縱向彎曲量，如圖 13 所示，發現平軋機咬入端有側導板模型中，鋼胚之縱向彎曲量反而較無側導板者來得高，而在圖 13 中亦發現平軋機兩端皆有側導板模型可有效修正縱向彎曲量。故前端有側導板時，縱向彎曲情形甚至較無側導板者還差，但兩端皆有側導板時則縱向彎曲量略有改善。

比較有無側導板對鋼胚橫截面厚度變

化是否有影響，如表 3 所示，由比較中可看出一號平軋機前後是否有側導板對軋軋後之鋼胚橫截面兩側厚度變化並無顯著的規律，但厚度差異可達 6mm，對橫截面厚度的變化應是有影響的。

## 4.2 二號平軋機加入側導板修正縱向彎曲分析

鋼胚在經過一號平軋機咬入端有側導板之模型軋軋後，其縱向彎曲量為 24.8mm，以此鋼胚結果進行二號平軋機有無側導板修正縱向彎曲現象之比較。鋼胚經由無側導板之二號邊軋機與二號平軋機裁減後，縱向彎曲量增至 75.0mm。鋼胚經由有側導板之二號邊軋機與二號平軋機裁減後，縱向彎曲量增至 51.0mm。將有無側導板之鋼胚軋軋後比較其縱向彎曲量，如圖 14 所示，可發現有側導板之模型可有效修正鋼胚縱向彎曲之現象。

比較有無側導板對鋼胚橫截面厚度變化是否有影響，如表 4 所示，由於鋼胚頭端撞擊至側導板導致頭端有大變形產生，故鋼胚頭端橫截面兩側厚度差異相當大，而在鋼胚中段及尾端鋼胚橫截面兩側厚度差異不大，由前述比較中可發現側導板對鋼胚橫截面厚度變化應是有影響的。

## 4.3 軋軋後鋼胚於鉛直方向跳動之探討

在各平軋機熱傳軋軋模型中，發現鋼胚在軋軋後於鉛直方向有跳動情形，如圖 15 所示，推測鋼胚經一號平軋機軋軋後再經過輸送軋軋時，鋼胚頭端可能撞擊至輸送軋導致鋼胚在鉛直方向產生跳動，而此跳動可能使鋼胚整體應力及應變值有所變化，導致鋼胚整體應力及應變頭尾端不對稱的情況。而在有側導板之二號平軋機軋軋後鋼胚撞擊至側導板使鋼胚跳動情形更加明顯，如圖 16。此現象可能導致在後續精軋區軋軋時鋼胚尾端撞擊至輸送軋之現象 (Tail Pinch)。在後續的熱傳模擬驗證上，應考慮此因素所造成之影響，並配合現場實際情況加以驗證。

## 4.2 反力之探討

在求得一號平軋機反力方面，我們設定將求得上粗軋機參考點反力，如圖 17 所示。圖 18 為一號平軋機軋輪的反力分布

圖，反力值會些微上下跳動，平均反力大約介於 26MN 到 30MN 之間，最大的一號平軋機反力為 30.76MN。

在求得二號平軋機反力方面，我們設定將求得邊軋機及上粗軋機參考點反力，如圖 19 所示。圖 22 為二號邊軋機邊軋過程時間歷程圖，最大反力為 3.68MN，因為鋼胚有縱向彎曲現象，所以可以看出鋼胚與左邊立軋軋先接觸到再與右邊立軋軋接觸，而因縱向彎曲現象，鋼胚寬度兩側並不是水平所以導致二號邊軋機的反力會有高低震盪的趨勢，圖 20 為二號平軋機平軋過程時間歷程圖，最大反力為 40.51MN，平均反力約在 25MN 到 30MN，但是反力也有上下震盪的現象，圖 21 則為二號邊軋機和二號平軋機的反力分佈圖，因為邊軋機裁減量較小所以反力也較小。

## 五、結論

1. 比較三種有無側導板之一號平軋機熱傳軋軋模型，從結果發現在一號平軋機兩端設置側導板可修正鋼胚之縱向彎曲量。且在有無側導板之 R2 道次模型分析比較中發現有側導板之 R2 道次模型可控制鋼胚縱向彎曲量。故鋼胚在各平軋機軋軋中，設置側導板可有效修正鋼胚縱向彎曲現象。
2. 在粗軋區軋軋時鋼胚撞擊至輸送軋導致鋼胚於鉛直方向有跳動情形，而在有側導板時跳動情形會更加明顯。此現象可能導致在後續精軋區軋軋時鋼胚尾端撞擊至輸送軋，在後續的熱軋加工模擬驗證上，應考慮此因素所造成之影響。
3. 一號平軋機與二號平軋機軋輪反力大都介於 25MN 至 30MN 之間，而二號邊軋機最大反力為 3.68MN，因為鋼胚有縱向彎曲現象導致反力有高低震盪的趨勢，後續可配合熱軋現場所提供的平軋機及邊軋機反力資訊，驗證熱軋加工模型的準確性。

## 六、致謝

本研究承蒙中國鋼鐵股份有限公司補助及提供資料，得以順利進行，特此致謝。

## 九、參考文獻

- [1] 苗潤濤, 1580mm 熱軋機板胚大側壓新技術, 寶鋼技術, Vol.2, pp.27-31, 1998.
- [2] H. Yamaguchi, Y. Kusaba and T. Yamada, Improvement of Seam-Defects on Strip Edge of Stainless Steel, Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 82, No. 1, pp. 58-62, 1996.
- [3] D.C. Ko, S.H. Lee, D.H. Kim, S.M. Byon, H.D. Park and B.M. Kim, Design of sizing press anvil for decrease of defect in hot strip, Journal of Material Processing Technology, Vol. 187-188, pp.738-742, 2007.
- [4] 紀武興, 不銹鋼熱軋製程鋼緣缺陷之模擬與分析, 國立中正大學機械工程研究所碩士論文, 2002.
- [5] 高裕倫, 應用三維有限元素法於鋼緣熱軋缺陷生成之分析, 國立中正大學機械工程研究所碩士論文, 2003.
- [6] 徐星杓, 鋼胚熱軋製成中的裁寬側壓過程分析, 國立中正大學機械工程研究所碩士論文, 2004.
- [7] 官正邦, 運用有限元素法分析鋼胚熱軋之 Sizing Press 側壓裁寬製程, 國立中正大學機械工程研究所碩士論文, 2005.
- [8] 游宗翰, 鋼胚熱軋之 Sizing Press 側壓裁寬製程及後續平軋製程之有限元素分析, 國立中正大學機械工程研究所碩士論文, 2005.
- [9] 胡賢磊, 趙忠, 劉相華, 王國棟, 閻智平, Analysis of Formation Reasons of Plate Camber, 鋼鐵, Vol. 41, No. 4, pp.56-61, 2006.
- [10] 何昆霖, 粗軋區 Sizing Press 裁寬製程鋼胚不對稱之有限元素分析, 國立中正大學機械工程研究所碩士論文, 2008

十、表格

Temperature Cofficient	1200°C	1400°C
Thermal conductivity (J/sec/m/°C)	29.75	31.75

表一 SAE1016 低碳鋼熱傳導係數與溫度的關係

Temperature Cofficient	1200°C	1400°C
Specific (J/Kg/°C)	29.75	31.75
Emissivity	0.731019	0.720459

表二 SAE1016 低碳鋼比熱及熱輻射係數與溫度的關係

厚度變化 (mm)	頭端		中段		尾端	
	高溫側	低溫側	高溫側	低溫側	高溫側	低溫側
無 side guide (基準)	0	0	0	0	0	0
咬入端有 side guide	+2	+1	+8.4	+3	-1	+1
兩端皆有 side guide	-3	-6	+8.4	+3	-0.1	+3.8

表三 一號平軋機有無側導板對鋼胚厚度變化之關係

厚度變化 (mm)	頭端		中段		尾端	
	高溫側	低溫側	高溫側	低溫側	高溫側	低溫側
無 side guide (基準)	0	0	0	0	0	0
兩端有 side guide	-11	+23	+1.5	-2.2	-3.3	+5.3

表四 二號平軋機及二號邊軋機有無側導板對鋼胚厚度變化之關係

十一、圖片

S1~S6 : Radiation & Convection  
 S5 : Conduction due to contact with the Hold down roll  
 S2、S5 : High pressure water

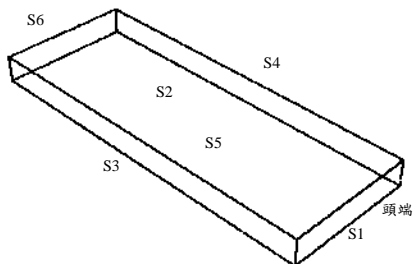


圖 1 鋼胚輸送過程熱傳模型

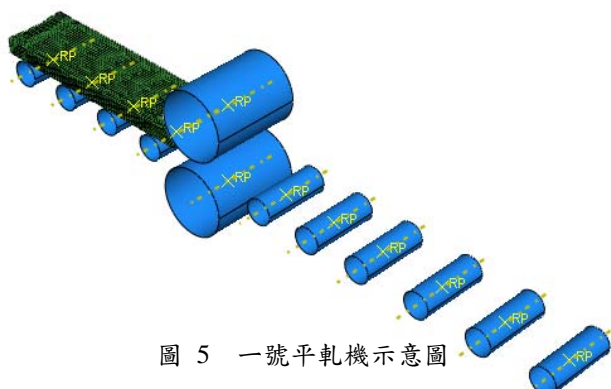


圖 5 一號平軋機示意圖

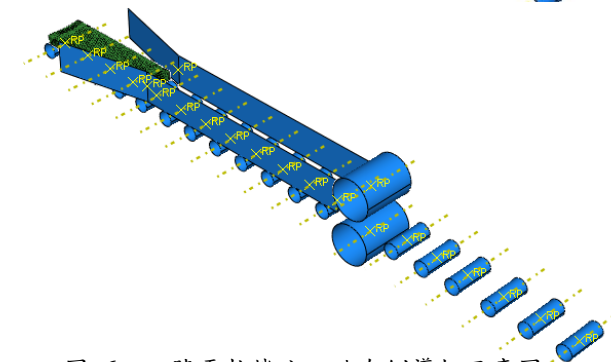


圖 6 一號平軋機咬入端有側導板示意圖

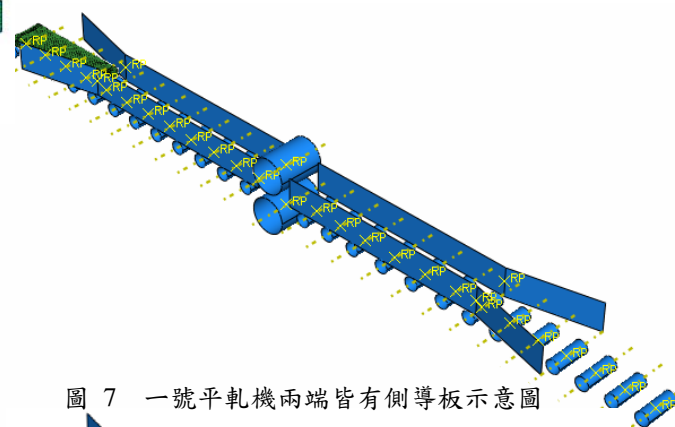


圖 7 一號平軋機兩端皆有側導板示意圖

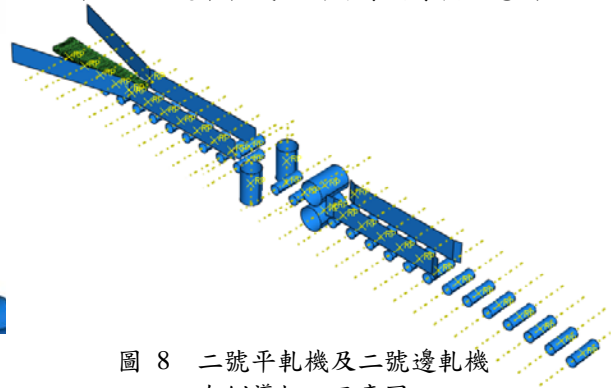


圖 8 二號平軋機及二號邊軋機有側導板之示意圖

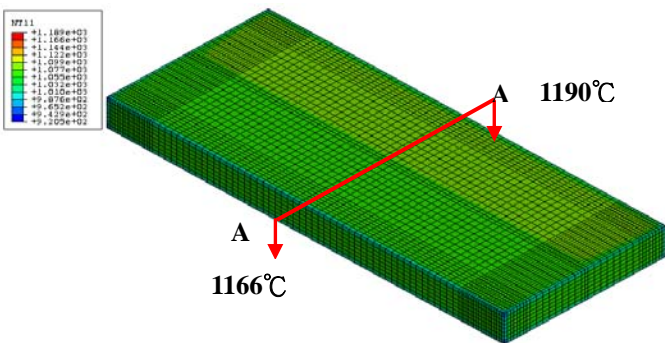


圖 2 鋼胚輸送過程熱傳模型

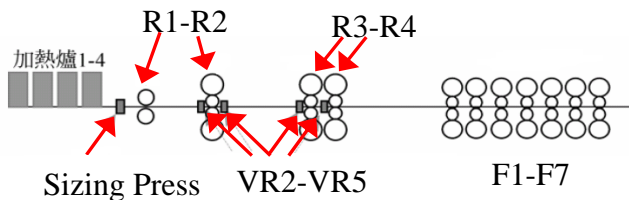


圖 3 熱軋加工流程

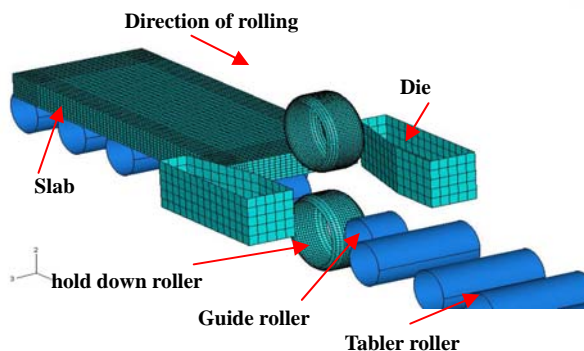


圖 4 側壓裁寬壓力機模型圖

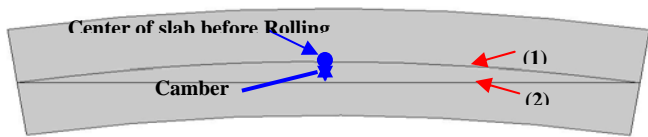


圖 9 鋼胚縱向彎曲示意圖(上視圖)  
 (1)為裁減前鋼胚寬度中心線  
 (2)為鋼胚頭端及尾端原始寬度中心點兩個點的連線

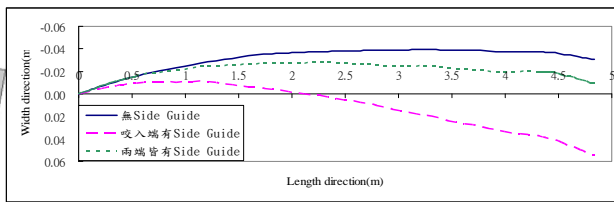


圖 13 三種有無側導板模型之鋼胚經一號平軋機縱向彎曲線比較示意圖與中心線比較示意圖

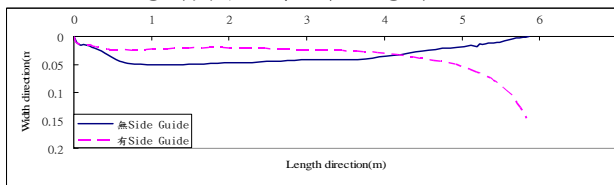


圖 14 二號平軋機及二號邊軋機有無側導板之鋼胚縱向彎曲線比較示意圖

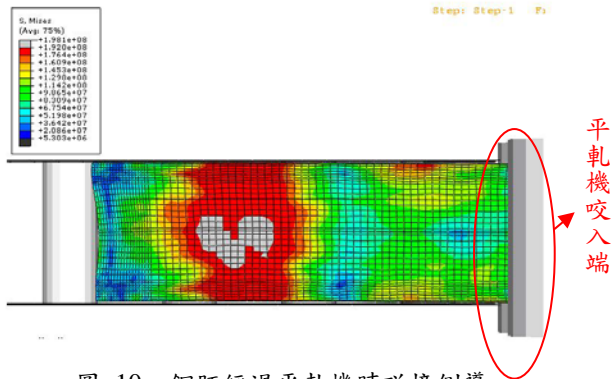


圖 10 鋼胚經過平軋機時碰撞側導板產生高應力上視圖

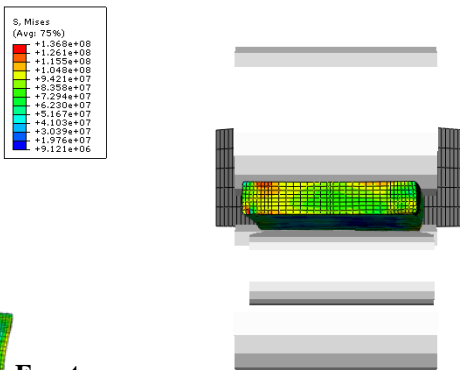


圖 15 在一號平軋機軋後鋼胚有跳動情況之前視圖

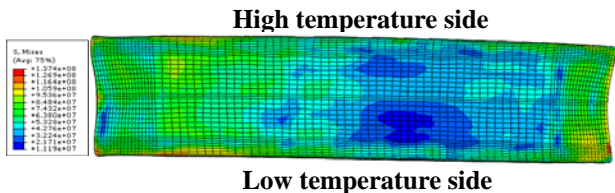


圖 11 一號平軋機咬入端有側導板之鋼胚應力分布上視圖

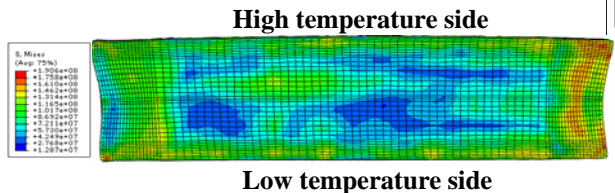


圖 12 一號平軋機兩端皆有側導板之鋼胚應力分布上視圖

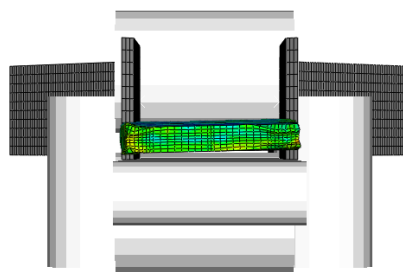


圖 16 在二號平軋機軋後鋼胚撞擊側導板產生跳動情況之前視圖

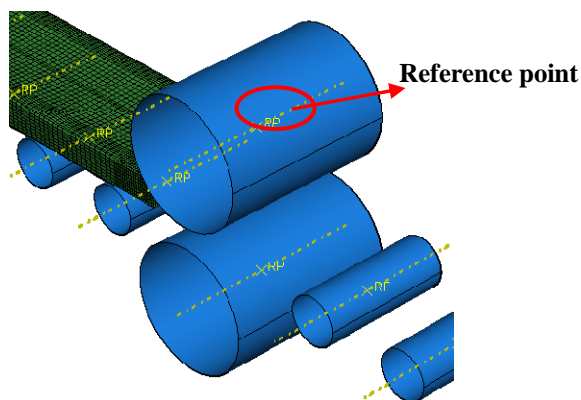


圖 17 一號平軋機上輓輪取反力之參考點示意圖

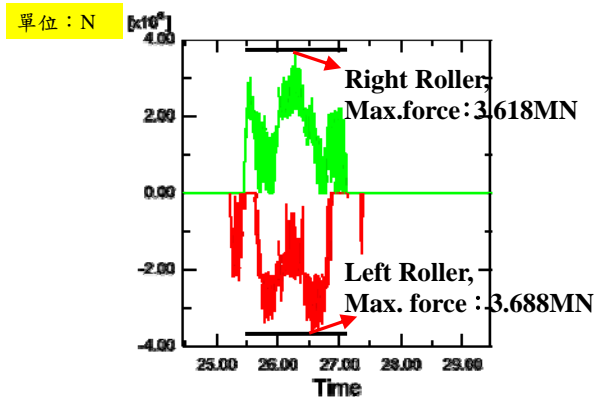


圖 20 二號邊軋機的反力時間歷程圖

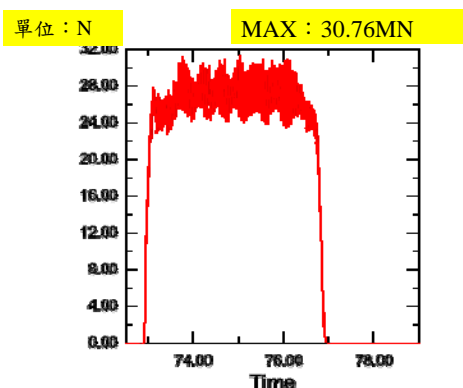


圖 18 一號平軋機輓輪的反力時間歷程圖

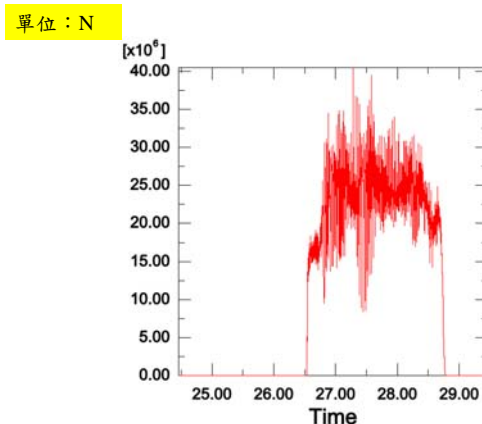


圖 21 二號平軋機的反力時間歷程圖

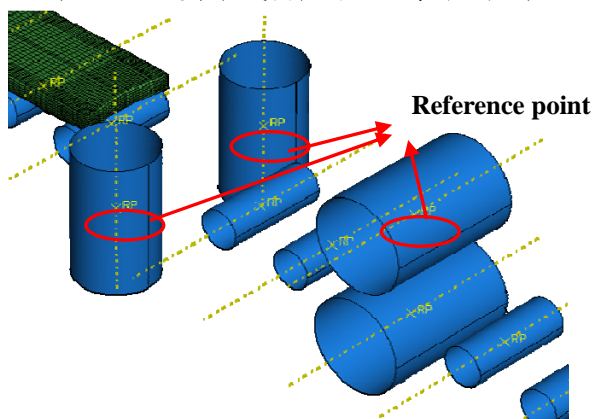


圖 19 二號邊軋機與二號平軋機取反力之參考點示意圖

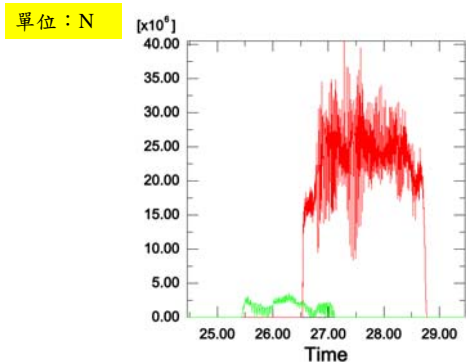


圖 22 二號平軋機及二號平軋機的反力時間歷程圖