

# 熱軋製程側導板與邊軋機對鋼胚形狀及反作用力之影響

## The Effect of Side Guides and Vertical Rolls on the Slab Shape and the Reactions during Hot Rolling

敖仲寧<sup>1</sup>, 許涵勳<sup>2</sup>, 戴瑋廷<sup>2</sup>, 葉彥良<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中正大學機械學系教授

<sup>2</sup>中正大學機械學系研究生

<sup>3</sup>中國鋼鐵股份有限公司鋼鋁研發處研究員

### 摘要

利用有限元素軟體 ABAQUS 模擬熱軋生產線，其模型包括平軋機、邊軋機與側導板，在模擬過程中側導板藉由調整開度矯正鋼胚外形之側彎量，邊軋機開度皆固定進而裁減鋼胚寬度並拘束鋼胚軋延方向。熱軋生產線之加熱爐位於生產線側邊，故鋼胚由加熱爐移置產線後可能會產生寬度方向溫度梯度，導致再經軋延後會產生縱向彎曲(Camber)及楔形截面(Wedge)現象，故探討側導板及邊軋機對鋼胚縱向彎曲及楔形截面之胚形矯正的機制。模擬過程中由改變側導板與邊軋機的參數進行模擬，並找出鋼胚軋延時的中心線路徑、側導板與邊軋機所受的作用力歷程和鋼胚最大裁減處的應力、應變及平軋軋之軋延力變化，進而了解鋼胚軋延過程中輓輪側導板與邊軋機上的反作用力及軋延後鋼胚胚形之改善。

**關鍵字：**熱軋側導板、鋼胚邊軋製程、鋼胚縱向彎曲、有限元素法

### ABSTRACT

Finite element analysis using ABAQUS was applied to simulate the hot rolling process. The model includes horizontal rolls, vertical rolls and a pair of side guides. During rolling the process the side guides corrected slab shape by adjustment the opening. The vertical rolls reduced slab width and constrain rolling direction by fixed the opening. The furnace of the hot roll line is located on one side of the line, the slab may experience a temperature gradient prior to hot rolling. The temperature gradient on the slab may cause camber along longitudinal direction and wedge of the transverse section after sizing press and horizontal rolling. During simulation the process parameters of the side guides and vertical rolls were varied to find the effect of side guides and vertical rolls on the slab shape and the reactions during hot rolling process.

**Keywords:** side guide, vertical roll, camber, wedge, hot rolling, finite element method

### 一、前言

軋軋加工是藉輓輪和材料之間的摩擦力將材料引進兩個轉動方向相反的輓輪之間，用來改變材料厚度、寬度或加工成不同形狀，為目前金屬成形加工最廣泛應用的塑性加工法。在軋延過程鋼胚由加熱爐移置生

產線時在寬度方向會產生溫度梯度，鋼胚會在邊軋機、平軋機及側導板之間往復來回進行加工，導致軋延結束後鋼胚會產生側向彎曲，如圖 1，故軋延模擬的初始鋼胚將以楔形截面(Wedge)與縱向彎曲(Camber)進行模擬。圖 2 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。鋼胚經邊軋機軋延後，鋼胚兩側會鼓起呈狗骨頭形狀，而鋼胚具溫度梯度，因此狗骨頭截面兩側厚度也會有差異。由於兩側厚度不同的鋼胚軋延時會些微將水平軋軋撐開，使軋輪傾斜，造成軋延後的鋼胚斜面呈楔形狀。本研究主要是利用中鋼實際熱軋的製程參數，使用有限元素軟 ABAQUS 建立粗軋機模型，探討鋼胚寬度方向溫度梯度對裁減結果影響，進一步找出較好的製程參數條件，增加生產效率與產品的品質。

## 二、文獻回顧

### 2.1 軋軋製程相關研究

Zang[1]等人利用三維剛塑性有限元素法建立邊軋機及平軋機模型，並使用 SSC(short stroke control)控制邊軋機軋延過程之開度，降低邊軋機對材料頭端和尾端的裁減量，成功改善再經平軋後的材料之頭尾端魚尾狀外形，有效降低頭尾端的切損，減少成本。Xiong[2,3]等人利用三維剛塑性有限元素法分析一系列的平板邊軋及平軋，再配合實驗所得數據與模擬結果之外形、寬展、軋延力、軋延扭矩做比對，將軋輪假設為彈性體，建立了軋延力、軋延力矩和沿著軋輪表面之接觸力。何昆霖[4]分析鋼胚進入 Sizing Press 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之現象。

### 2.2 鋼胚縱向彎曲及楔形截面相關研究

Knight[5]等人探討熱軋製程中之製程操作條件如軋輪裁減量、軋輪轉速、鋼胚表面與內部之溫度差異及鋼胚與軋輪間之摩擦力等對鋼胚橫截面之影響。游宗翰[6]依照熱軋生產線實際情況修改裁寬壓力機(Sizing Press)模型及建立後續軋延模型，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[7]等人分析了造成鋼胚縱向彎曲的原因，包含了鋼胚楔形橫截面、鋼胚寬度方向溫度分布不均、鋼胚偏移出軋輪中心、軋輪形狀以及軋輪兩側剛度上的差異，而溫度分布不均和軋輪外形影響縱向彎曲最為嚴重。謝銘峰[8]利用有限元素法建立邊軋及平軋模型，並依照熱軋生產線操作條件在生產線前後加入側導板模型以探討側導板矯正鋼胚外型的功效，發現鋼胚碰觸側導板時會使邊緣元素過度變形，但產生的力矩可以矯正鋼胚的外型，但同時會使鋼胚兩側的厚度差距變得更明顯。

## 三、熱軋加工製程

在熱軋加工製程上分為粗軋區(R & V)及精軋區(F)，如圖 3，其中一號平軋機簡稱 R1，二號平軋機簡稱 R2 依此類推。二號邊軋機簡稱 VR2，依此類推。裁寬製程則是利用裁寬壓力機取代邊軋機，而裁寬壓力機到 R4 之間為粗軋區，F1 至 F7 為精軋區，而最後為盤捲區。為了修正鋼胚的形狀，在熱軋生產線以一對可動的側導板機構置於各道次前後，而側導板機構則簡稱為 SG。粗軋區加工過程先將鋼胚加熱到適當溫度在經過高壓噴水除銹後開始裁減，先經過裁寬壓力機和一號平軋機，接下來在二號邊軋機、二號平軋機及三號邊軋機之間來回往復加工，裁減至設定的加工尺寸之後繼續依照原本軋延方向繼續加工。

## 四、二號粗軋機及側導板介紹

### 4.1 二號粗軋機模型

在二號粗軋機中包括平軋機(HR)、二號及三號邊軋機(VR2、VR3)、輸送軋及側導板，如圖 4。二號粗軋機主要利用反覆來回的軋延使軋延後鋼胚厚度變薄，長度變長，但目前只對第一道次軋延進行模擬，尚未進行後續道次的軋延模擬，故在此模擬過程中三號邊軋機並不會跟鋼胚接觸，後續所指的邊軋機皆為二號邊軋機(VR2)。在軋延的過程中二號邊軋機之裁寬量為 20 mm，二號平軋機之裁減量為 40 mm。為了比較鋼胚經二號粗軋機及側導板軋延時二號平軋機兩側

軋延力的變化，故將平軋機上軋輪切為九等分之剛體，分別計算軋延時軋輪所受之力，如圖 5。橫截面則是取鋼胚經平軋機最大裁減處橫截面來探討其應力應變變化。

#### 4.2 側導板作動方式

側導板作動方式可分為位置模式 (Position mode) 以及力量模式 (Force mode)，本研究側導板模式為前者。位置模式側導板的作動方式為鋼胚頭端進入入口側導板位置時，側導板會先夾緊調整鋼胚位置，再打開至設定之寬度，如圖 6(a)。鋼胚經過各道次軋延後，使鋼胚受側導板之引導而前進同時校正鋼胚縱向彎曲量。在模擬過程中，側導板作動方式將省略了夾緊鋼胚的對正動作，直接由全開狀態向內縮至所設定的開度，如圖 6(b)所示。模擬過程中入口端側導板由原始設定開度 100mm，在模擬時間 0 秒到 0.5 秒向內縮減 90mm 至比鋼胚平均寬度加 10mm，出口端側導板向內縮的作動時間為 4 秒到 4.5 秒，其設定開度也是比鋼胚平均寬度加 10mm。

### 五、有限元素模型

#### 5.1 鋼胚模型

本研究探討的鋼胚材料為 SAE1016 低碳鋼，假設熱軋過程之應變率為 1，利用 Gleeble 實驗得到 SAE1016 低碳鋼在 1100 °C 的真實流變曲線其降伏應力為 65 MPa，楊氏係數為 78GPa，浦松比為 0.3，利用此流變曲線代入有限元素模型計算。

熱軋過程鋼胚元素類型使用六面體實體元素，計算時使用簡化積分。為了單獨探討側導板機構對鋼胚在熱軋過程中之影響，在此建立均溫且長度、寬度及厚度分別為 10 m、1.2 m 和 0.22 m 的鋼胚模型，元素共有 50119 個，節點 50125 個，元素的名稱為 C3D8I[9]。

#### 5.2 模擬計算方法

在整個模型中，將軋輥、輸送輥以及側導板設定為剛體，鋼胚設定為可變形體。在邊界條件上，軋輥以固定開度的方式進行裁寬、裁厚，側導板則是以不同時間固定兩側位移。在軋延過程中，鋼胚同時和軋輥、輸

送輥以及側導板接觸，在接觸面積較多的情形下，相較於隱式積分法，本研究採用顯式積分法分析軋延過程較能有效降低模擬時間。在本研究中需計算多組不同操作條件模型，故在模擬計算時間上也採用 Mass scaling factor (MSF) 來減少計算時間，使用 MSF 雖可減少計算時間，但會增加材料密度，因此模擬時會使鋼胚的動能增加，造成鋼胚和側導板碰觸時的力量及反力計算結果失真，本研究分別使用 MSF 50、40、30、1 進行模擬。發現 MSF 對等效塑性應變、鋼胚形狀與縱向彎曲量之計算結果影響不大，但對側導板上的反力值確實有明顯影響。由於不同 MSF 對等效塑性應變誤差皆在合理範圍內，且軋延過後鋼胚縱向彎曲量也不大。因此後續將使用 MSF 50 以節省計算時間。

### 六、結果討論

#### 6.1 不同軋延參數對楔形截面鋼胚軋延之影響

##### 6.1.1 模擬過程中軋輪軋延力變化

初始鋼胚為楔形截面模型，其鋼胚 WS 側厚度較 DS 側厚度高 1mm，如圖 7。經平軋後楔形截面鋼胚會產生縱向彎曲，在軋延過程中若無側導板拘束，鋼胚頭端往 DS 側持續偏移，故須利用側導板矯正鋼胚側彎量。在模擬過程 2.5 秒時如圖 8(a)，此時鋼胚剛進入平軋機，由於初始鋼胚在軋延方向上平直，通過入口端側導板時鋼胚並不會與側導板產生碰撞，故入口端側導板的反力皆為 0，在尚未碰觸出口端側導板時，兩側邊軋機的軋延力差也將近為 0。因初始楔型鋼胚形狀 WS 側較 DS 側厚，因此平軋時平軋輥上之 WS 側軋延力會大於 DS 側，如圖 8(b)。鋼胚橫截面 WS 側之軋延方向應力應變亦明顯大於 DS 側者，說明此時鋼胚的 WS 伸長量較 DS 側大，會使得鋼胚往 DS 側彎曲而產生外形的改變，如圖 8(c)。

鋼胚隨著平軋長度增加，彎曲量亦隨之增加，彎曲量到達一定的程度時鋼胚就會和出口端 DS 側的側導板擦撞，此時 DS 側側導板上的反作用力就會使鋼胚產生反向的彎曲。圖 9(a)在模擬過程 4.17 秒時，此時

鋼胚頭端因楔型截面轉換成縱向彎曲量已大於側導板的開度，鋼胚開始碰觸到出口端側導板 DS 側，其碰觸力量為 0.93 MN，此碰觸產生的反力會以二號邊軋機和平軋機為支點對鋼胚產生一順時針力矩，如圖 10。

在邊軋機上，鋼胚頭端碰觸到出口端側導板 DS 側，此時平軋機仍持續在軋延中，會以平軋機為支點，鋼胚尾端則會朝 DS 側偏，在 4 秒到 4.5 秒側導板矯正鋼胚間以致在兩側邊軋機的軋延力差(以 DS 側減 WS 側力量)歷程，DS 側邊軋機的軋延力增大，如圖 11。在平軋機軋延力也可發現在鋼胚碰觸到側導板後，WS 側的軋延力明顯較 DS 側軋延力大，如圖 9(b)，也可比較圖 9(a)與圖 9(b)碰觸到出口端側導板前後的平軋機軋延力大小。在尚未碰撞到側導板前以 WS 側的應變較 DS 側來的大，在碰撞到側導板後，因順時針力矩的影響，使得平軋機中的鋼胚 DS 側受到一張力，而 WS 側受到一壓力，使鋼胚 DS 側軋延方向之應力與應變變大(拉長)，而 WS 側變小(壓縮)，如圖 9(c)。

鋼胚頭端於 4.6 秒與出口端 WS 側側導板碰觸，如圖 12(a)，此時與側導板碰觸的反力值為 1 MN，側導板作用在鋼胚上的反力會以邊軋機和平軋機為支點對鋼胚形成一逆時針力矩，平衡 4.17 秒時鋼胚碰撞產生的順時針力矩，使平軋機之軋延力和橫截面軋延方向之應力應變值回復到較初狀態，因碰觸的影響，平軋機上的軋延力分布其 WS 側軋延力雖依然大於 DS 側，如圖 12(b)，但其軋延力值回復到鋼胚還未碰觸側導板前的大小，而鋼胚之橫截面軋延方向應變分布也變回 0 秒至 4.17 秒時的狀態，其 WS 大於 DS 側，如圖 12(c)。

前後皆有側導板且開度為 10mm，由圖 13(a)可知碰撞初期側導板的反力可發現，鋼胚碰觸到側導板 DS 側以後有彈開的現象，因為與側導板持續接觸故反力為 0，這是因為我們在模型中設定了比較大的 Mass scaling factor(=50)，使得鋼胚模型的動能變大，故碰觸側導板時會產生反彈的現象，如圖 12(a)。將二號粗軋機側導板的開度 10mm 改變為 14mm，當鋼胚完全進入側導板後，則可明顯看到開度較寬的側導板(14mm)產生的反力較小，如圖 13(b)。

另外藉由探討移除邊軋機(VR2)對軋延模擬的影響，在沒有邊軋機拘束，鋼胚尾端通過入口端側導板時會產生輕微的碰觸，如圖 13(c)，在約模擬時間 4 秒至 4.4 秒之間，鋼胚同時接觸入口端側導板和出口端側導板。在無邊軋機之模型軋延後鋼胚尾端嚴重往 DS 側偏移，造成鋼胚在 7.5 秒至 8 秒出口端側導板接觸力大增，而有邊軋機之模型偏移情形較輕微，顯示邊軋機能夠有效的矯正鋼胚尾端的偏移情況。

### 6.1.2 軋延後之鋼胚外形與側彎量

鋼胚軋延後若無側導板的拘束，鋼胚會朝 DS 側偏移，而加入側導板拘束後，鋼胚的中心線偏移量明顯減小許多，圖 14 為加入側導板之熱軋模型鋼胚縱向彎曲量為 16.3 mm，彎曲方向朝 DS 側彎曲，較無側導板模型縱向彎曲量 48mm 大幅下降，因此可以歸納側導板機構可以有效導正鋼胚的側彎量，並能矯正鋼胚的縱向彎曲與外形。

將側導板開度增加為 14mm，圖 15 為熱軋模型中側導板的開度對楔形截面鋼胚熱軋後之外形與縱向彎曲量比較。由於兩例之鋼胚皆因受到側導板的拘束，以致軋延過後偏移趨勢相差不大，其側導板開度為 14mm 模型之鋼胚縱向彎曲量為 20.7 mm，彎曲方向朝 DS 側彎曲，較側導板開度為 10mm 模型之鋼胚縱向彎曲量 16.3mm 大，故可歸納出開度較窄的側導板能較有效的校正鋼胚之縱向彎曲，但開度窄的側導板所受的反力也較大，可能對側導板的使用壽命較為不利。

圖 16 為鋼胚通過粗軋機後之外形與縱向彎曲量比較，可以看到無邊軋機之模型軋延後鋼胚尾端嚴重往 DS 側偏移，而有邊軋機之模型偏移情形較輕微，顯示邊軋機能夠有效的矯正鋼胚尾端的偏移情況。其無邊軋機模型之鋼胚縱向彎曲量為 27.6 mm，彎曲方向朝 DS 側彎曲，較有邊軋機模型的鋼胚縱向彎曲量 16.3mm 為大，由此亦可證實粗軋機結合前後端側導板的組合之下，邊軋機也具有矯正縱向彎曲的能力。

## 6.2 不同軋延參數對縱向彎曲鋼胚軋延之影響

### 6.2.1 模擬過程中輓輪軋延力變化

縱向彎曲鋼胚的初始形狀尾端朝 WS 彎 12.3mm，如圖 17。在模擬時間 2.2 秒時，此時鋼胚剛進入平軋機，由於鋼胚尾端彎曲，且縱向彎曲量(12.3mm)大於入口端側導板開度(10mm)，故鋼胚通過入口端側導板時會與側導板兩側同時接觸，圖 18 為入口端與出口端側導板受力歷程，此時產生的力量可以矯正鋼胚的形狀。在邊軋機的軋延力差歷程(以 DS 側減 WS 側力量)，此時 WS 側邊軋機的軋延力明顯大於 DS 側，如圖 19，主要原因是當鋼胚通過入口端側導板時，原來朝 WS 側彎曲的尾端碰觸 WS 側側導板，造成鋼胚順時針方向旋轉，使得進入邊軋機裁寬的頭端會受到側向推擠，如圖 20 會形成邊軋機兩側軋延力不均，以致鋼胚兩側會形成厚度不均，導致經平軋後鋼胚會朝 DS 側彎曲。

在模擬時間 3.2 秒時，鋼胚前段經平軋後出現了中心線向 DS 側反向彎曲的現象，如圖 21(a)。由於鋼胚彎曲的尾端通過邊軋機時鋼胚位置會受邊軋機的限制，故此時鋼胚只有接觸入口端 WS 側的側導板，但其接觸的反力很小，參考圖 18 側導板受力歷程，此時並不能有效矯正鋼胚外型。在兩側邊軋機軋延力差，其 DS 側邊軋機軋延力還是大於 WS 側，參考圖 18。在平軋輓上的軋延力分布，因平軋機中的鋼胚較偏 WS 側，其平軋輓上的 WS 側外側軋延力大於 DS 側，如圖 21(b)。在鋼胚橫截面兩側的軋延方向應變，此時兩側應力大小相差不多，但是 WS 側應變卻明顯大於 DS 側，如圖 21(c)，故平軋後的鋼胚會朝 DS 側出現反向彎曲現象。

鋼胚在 4.5 秒因反向彎曲而碰觸出口端 DS 側側導板，如圖 22(a)，此觸碰之力值為 0.41 MN，並以邊軋機與平軋機為支點，對鋼胚形成一順時針力矩，造成鋼胚 DS 側軋延方向受張力，而 WS 側受壓力。並以邊軋機與平軋機為支點，對鋼胚形成一順時針力矩，造成鋼胚 DS 側軋延方向受張力，而 WS 側受壓力。在平軋輓上的軋延力分布與鋼胚橫截面 WS 側軋延方向應力，沒有明顯的變化，如圖 22(b)，但明顯看到鋼胚橫截

面 DS 側軋延方向應變大於 WS 側，如圖 22(c)，代表鋼胚 DS 側的伸長量大於 WS 側，使鋼胚朝 WS 側彎曲。

在模擬過程中將初始鋼胚縱向彎曲量減半成 6.5mm，當鋼胚進入入口端側導板時，初始朝 WS 側彎曲的尾端會先觸碰側導板之 WS 側，但是由於鋼胚的縱向彎曲量 6.15mm 比側導板的開度小(鋼胚平均寬度加上 10mm)，因此在通過入口端側導板時的碰觸明顯比縱向彎曲量為 12.3 時少許多，由於彎曲的尾端經過邊軋機，鋼胚的頭端往 WS 側彎曲，因此約在模擬至 4.5 秒時觸碰到側導板之 WS 側，而在 4.6 秒時反彈觸碰 DS 側側導板。

### 6.2.2 軋延後之鋼胚外形與側彎量

經過側導板與粗軋機完整的軋延後，比較有無側導板模型，如圖 23 為鋼胚的中心線位置與縱向彎曲量，無側導板模型的鋼胚軋延後嚴重往 WS 側偏移，而有側導板模型之鋼胚因有出口端側導板限制故整體平均偏移量較小，因此可歸納出側導板可有效導正鋼胚軋延後的偏移。有側導板模型之鋼胚胚形由原本的 C 字形改變成具反向彎曲之 S 字形，其頭端往 DS 側偏移，整體縱向彎曲量為 12 mm，呈反向彎曲。故前後側導板對原來具縱向彎曲之鋼胚在軋延後有導正鋼胚形狀的作用，而縱向彎曲量之值與無側導板者相比差異不大。

圖 24 為初始鋼胚不同縱向彎曲量的外型與側彎量比較，縱向彎曲量為 6.15mm 之鋼胚軋延過後會向 DS 側偏移，但由於熱軋模型具出口端側導板限制鋼胚的位置，故鋼胚彎曲量為 6.15mm 與和縱向彎曲量為 12.3mm 的鋼胚偏移量都很輕微。但初始縱向彎曲量為 6.15mm 之鋼胚經軋延後胚形由原本 C 字型改變成 S 字型，而縱向彎曲量改善至 1.6mm，彎曲方向正常。由於此模型之鋼胚初始縱向彎曲量較小，故鋼胚經入口端側導板時和邊軋機的推擠作用較不明顯，因此並沒無和縱向彎曲量為 12.3mm 的模型一樣產生反向彎曲。

## 七、結論

1. 初始楔形截面鋼胚經平軋機軋延後，楔形截面量會轉換成縱向彎曲量，導致鋼胚產生偏移，但可藉由通過側導板和邊軋機與鋼胚接觸所產生的力矩修正鋼胚之偏移。
2. 入口端及出口端側導板對鋼胚縱向彎曲量確實有矯正效果，自 48mm 矯正至 16.3mm。
3. 側導板開度過大時矯正鋼胚板形的效果較差，但開度太小會使側導板與鋼胚的接觸力量大，可能影響側導板壽命。
4. 當縱向彎曲鋼胚軋延時會接觸入口端側導板，此時會造成鋼胚順時針方向旋轉使得進入邊軋機的頭端受到側向推擠，因此鋼胚兩側產生的厚度差，再經軋延後會產生鋼胚形狀反向彎曲現象。
5. 邊軋機主要的功能為裁減鋼胚的寬度，經本研究分析也能配合側導板導引鋼胚行進路線提供反向彎折之力矩，修正鋼胚縱向彎曲。
6. 鋼胚的初始縱向彎曲量較小時，鋼胚接觸入口端側導板的力量較小，連帶造成的厚度差異也較不明顯，因此平軋後反向彎曲現象會較輕微。

## 八、未來展望

目前模擬之二號粗軋機上的側導板皆使用位置模式(Position mode)控制，但在中鋼的熱軋產線上也發展出側導板利用力量模式(Force mode)控制，經軋延後在外形上的側彎量會較位置模式大，但能有效降低側導板的損耗。力量模式側導板的作動主要是利用力量控制，當側導板與鋼胚的作用力大於所設定的力量時則將側導板開度增加，若小於所設定力量則將開度增加。

目前建立的二號粗軋機的模型上，在各零件上皆設定為剛體進行模擬，但在實際熱軋現場中，粗軋機的各部份零件均非剛體，因此為了貼近現場狀況，後續在數值模型中將邊軋機及平軋機加上彈簧元素，模擬粗軋機軋延時軋輥受反力而產生彈張現象，藉此得到更接近現實的模擬結果。

## 九、參考文獻

- [1] ZANG Xin-liang, LI Xue-tong, DU Feng-shan, Head and Tail Shape Control in Vertical-Horizontal Rolling Process by FEM, Journal of Material Processing Technology, Vol. 209, pp.728-736, 2009. Journal of Iron and Steel Research, International. 2009, 16(5): 35-42.
- [2] S. U. Xiong, J.M.C. Rodrihues and P.A.F. Martins, Three-dimensional simulation of flat rolling through a combined finite element-boundary element approach, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 32, pp.221-233, 1999.
- [3] S. U. Xiong, X. H. Liu, G. D. Wang and Q. Zhang, A Three-Dimensional Finite Element Simulation of the Vertical-Horizontal Rolling Process in the Width Reduction of Slab, Journal of Material Processing Technology, Vol. 101, pp.146-151, 2000.
- [4] 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.
- [5] C. W. Knight, S. J. Hardy, A. W. Lees and K. J. Brown, Investigations Into the Influence of Asymmetric Factors and Rolling Parameters on Strip Curvature during Hot Rolling, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 134, pp.180-189, 2003.
- [6] 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, 2006.
- [7] 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.
- [8] 謝銘峰, 鋼胚熱軋製程中加入側導板之平軋製程有限元素分析, 國立中正大學機械工程研究所碩士論文, 2009.
- [9] A BAQUS User's Manual, Version 6.9

十、圖片

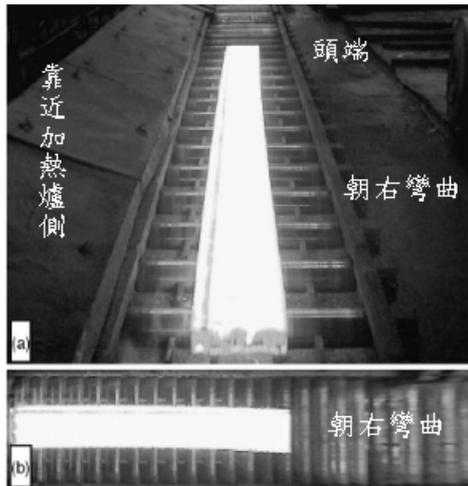


圖1. 具溫度梯度之鋼胚軋延後形成縱向彎曲

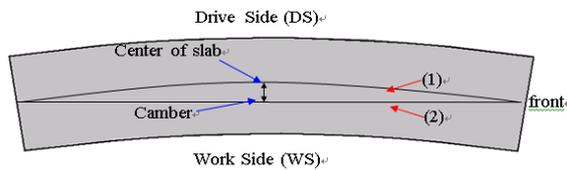


圖2. 鋼胚縱向彎曲示意圖(上視圖)(1)鋼胚寬度中心線(2)鋼胚頭端及尾端原始寬度中心點兩點的連線

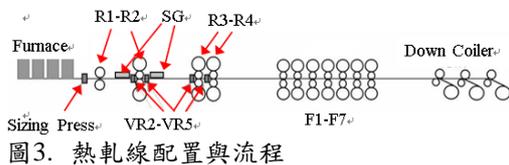


圖3. 熱軋線配置與流程

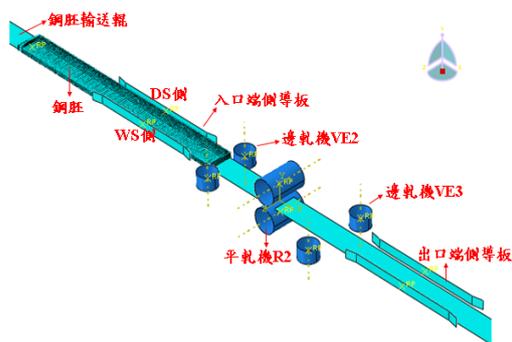


圖4. 二號粗軋機示意圖

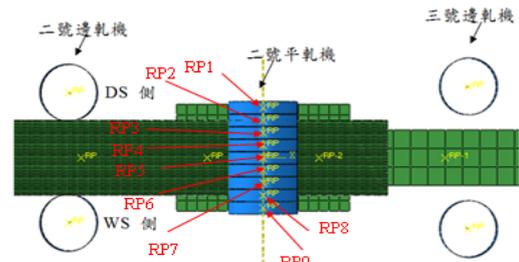


圖5. 計算平軋軋力分布之參考點

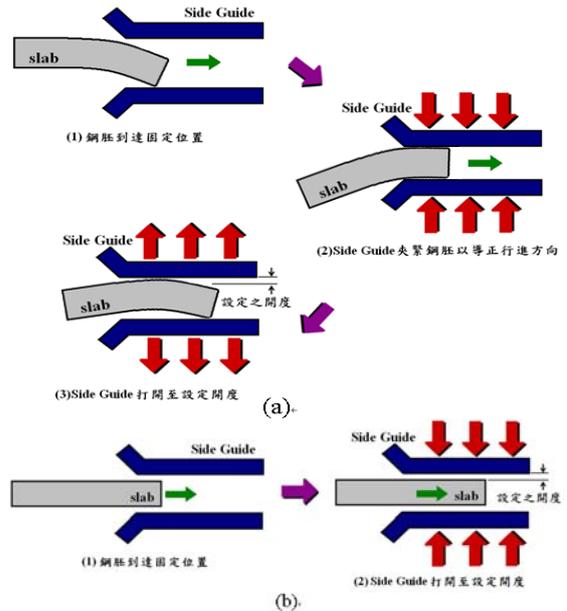


圖6. (a)位置模式側導板作動方式(b)模擬過程側導板作動方式

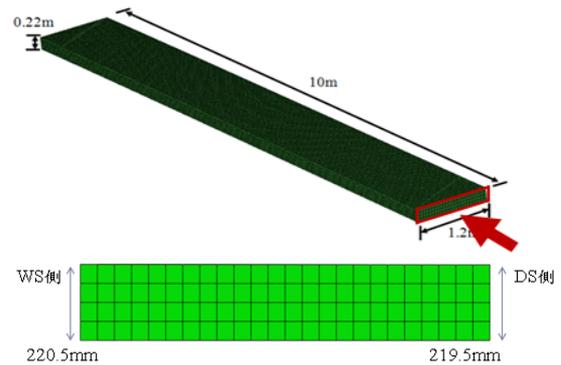


圖7. 楔形截面初始鋼胚前視圖

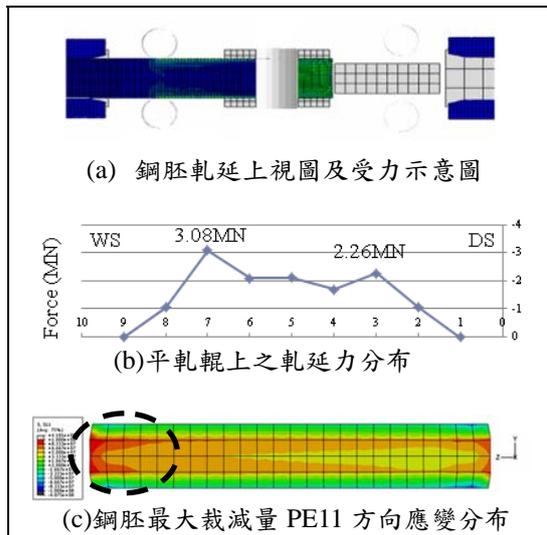


圖8. 楔形截面鋼胚粗軋 2.5 秒時的狀態

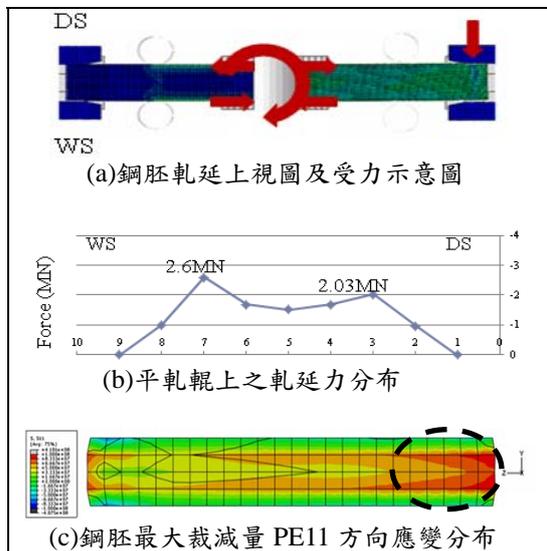


圖9. 楔形截面鋼胚粗軋 4.17 秒時的狀態

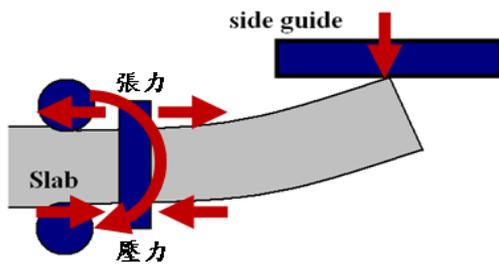


圖10. 碰觸出口端側導板產生順時力矩示意圖

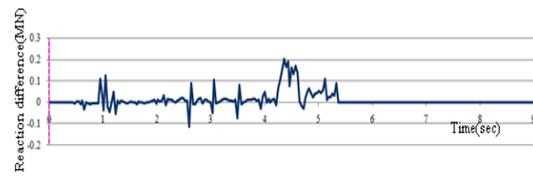


圖11. 兩側邊軋機的軋延力差歷程(DS側力量減WS側力量)

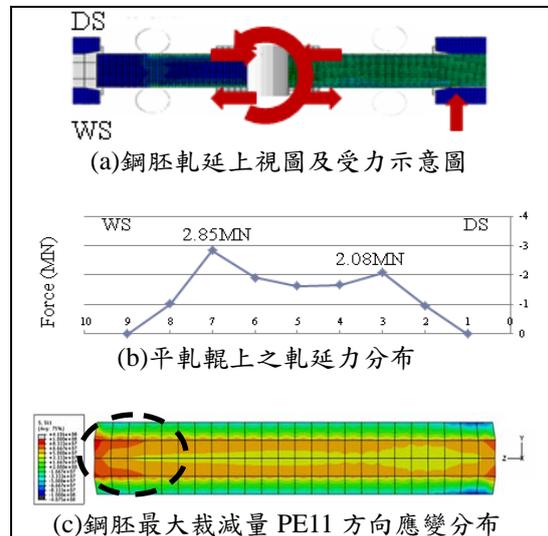
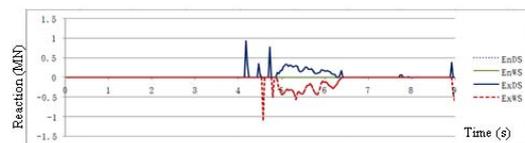
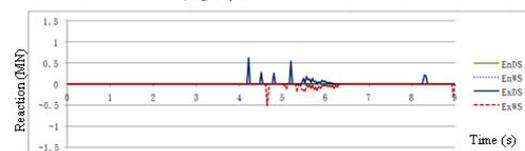


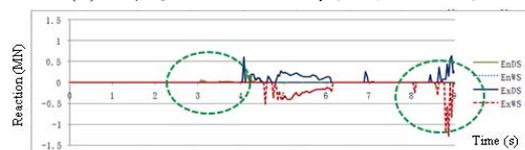
圖12. 楔形截面鋼胚粗軋 4.6 秒時的狀態



(a) 開度 10mm 且前後皆具有側導板之反力歷程



(b) 開度 14mm 之側導板的反力歷程



(c) 移除邊軋機之側導板反力歷程(前後皆具側導板)

圖13. 不同熱軋參數對側導板之反力歷程的變化

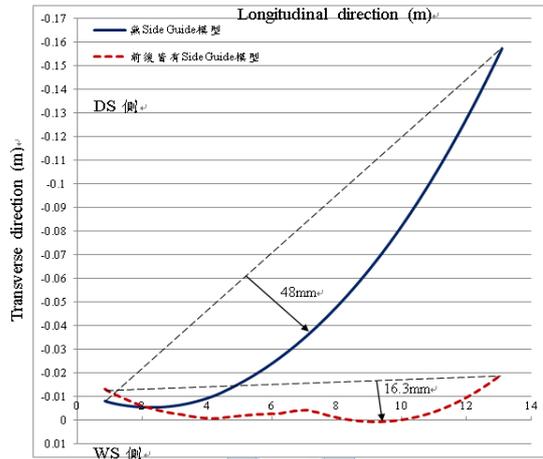


圖 14. 楔形截面鋼胚通過有無側導板熱軋模型後之中心線型態與縱向彎曲量比較

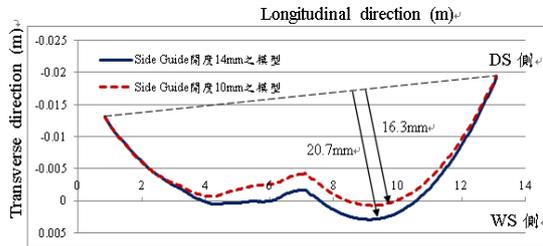


圖 15. 側導板的開度對楔形截面鋼胚熱軋後之縱向彎曲量影響

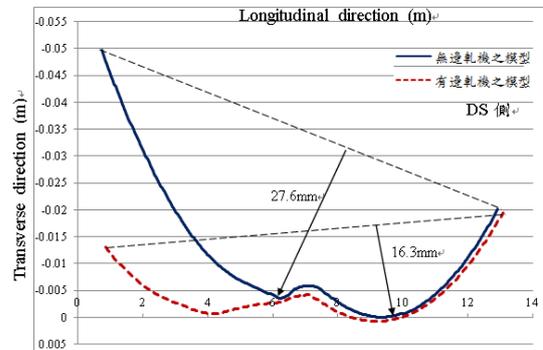


圖 16. 楔形截面鋼胚通過有無邊軋機之粗軋模型(具側導板)後之中心線型態與縱向彎曲量比較

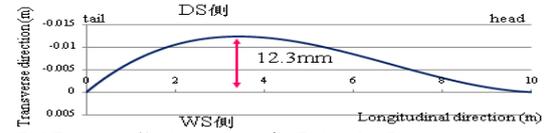
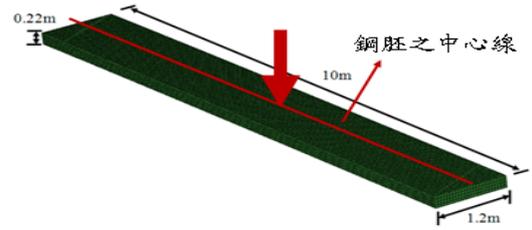


圖 17. 縱向彎曲鋼胚示意圖(上視圖)

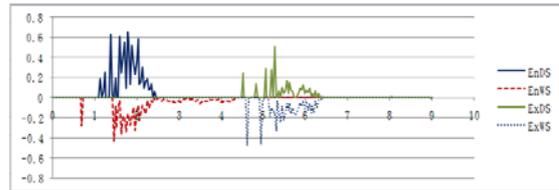


圖 18. 縱向彎曲入口端與出口端側導板受力歷程

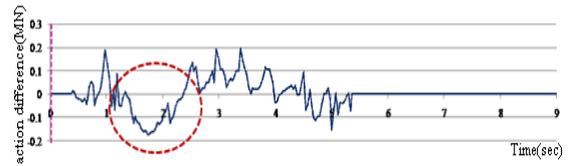


圖 19. 縱向彎曲鋼胚模型兩側邊軋機軋延力差(DS 側力量減 WS 側力量)

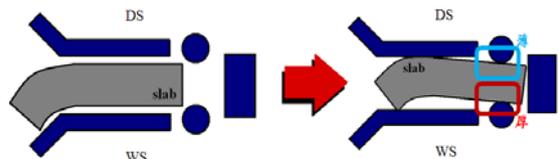


圖 20. 縱向彎曲鋼胚經入口端側導板和邊軋機造成兩側厚度不均

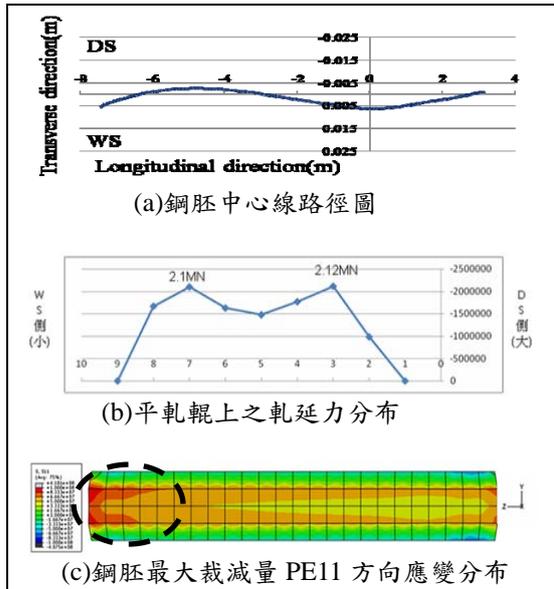


圖21. 縱向彎曲鋼胚粗軋 3.2 秒時的狀態

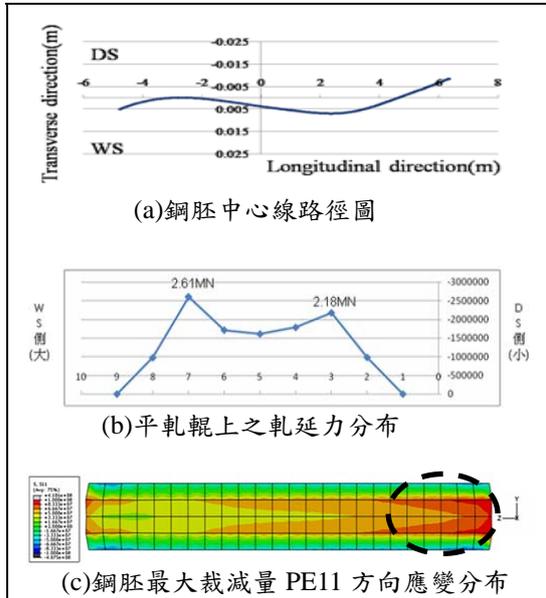


圖22. 縱向彎曲鋼胚粗軋 4.5 秒時的狀態

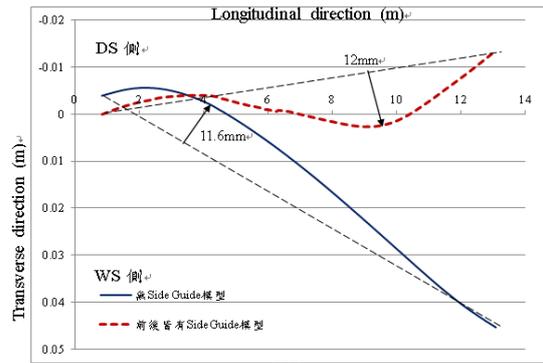


圖23. 縱向彎曲鋼胚通過有無側導板熱軋模型後之中心線型態與縱向彎曲量比較

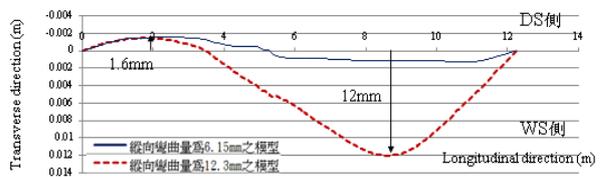


圖24. 不同縱向彎曲量模型軋延過後中心線型態與縱向彎曲量比較