

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參數如輓輪裁減量、輓輪轉速、鋼胚表面與內部之溫度差異及鋼胚與輓輪間之摩擦力等對鋼胚橫截面之影響。何昆霖[6]分析鋼胚離開加熱爐所產生的溫度梯度會使鋼胚往溫度低側彎曲，在通過裁寬壓力機後溫度較高側厚度會較厚，進而產生挫曲、狗骨頭外型等現象，探討不同的咬入位置所產生的縱向彎曲量，並調整平軋機上輓輪傾斜角度來修正鋼胚縱向彎曲之現象。胡賢磊[7]等人分析了造成鋼胚縱向彎曲的原因，包含了鋼胚橫截面不對稱、鋼胚寬度方向溫度分佈不均、鋼胚偏移粗軋輓中心、軋輓兩側剛度上的差異，而溫度分佈不均和軋輓外形影響縱向彎曲最為嚴重。許涵劃[8]建立出口端及入口端之位置模式邊導器和粗軋模型，探討楔形截面與縱向彎曲兩種不同的鋼胚外型在軋延的過程中邊導器對其的影響；由研究得知邊導器配合邊軋機所提供的反向彎折之力矩能有效矯正軋延過程中所產生的縱向彎曲量，並從邊導器及邊軋機的反力歷程進一步解釋鋼胚中心線彎折之原因。戴瑋廷[9]藉由數值方法探討熱軋產線邊導器機構矯正鋼胚胚形的機制，藉此瞭解粗軋過程有無邊導器對完軋後鋼胚縱向彎曲量的影響，並成功建立了產線現有的兩種邊導器控制模式的數值模型，比較兩種模式於產線上之適用性；而數值模型中各機構皆加入彈張元素，使數值模型更符合實際產線的條件，而能使模擬的結果更為符合實際產線的現象。

三、軋延流程與機構介紹

圖3為熱軋鋼帶粗軋區及精軋區加工流程圖。故一號平軋機(Horizontal Rolls)簡稱R1，二號平軋機簡稱R2依此類推。平軋機是用來裁減鋼胚的厚度。二號邊軋機(Vertical Rolls)簡稱VR2，三號邊軋機簡稱VR3依此類推。邊軋機是裁減鋼胚的寬度。裁寬製程則是利用裁寬壓力機(Sizing Press)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。邊導器機構則簡稱為SG，分別放置在二號平軋機R2前後。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厚度，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，裁減至設定的厚度之後繼續依照原本軋延方向繼續裁減。

本研究主要探討粗軋區中的二號粗軋機。在熱軋現場定義鋼胚兩側分別為驅動側(Drive Side, DS)與操作側(Work Side, WS)，驅動側是裝設驅動機台的一側，而操作側則是人員操作的一側，圖4為二號粗軋機上視示意圖。在粗軋機中加入進口端邊導器(Entrance SG)、中間邊導器(Intermediate SG)以及出口端邊導器(Exit SG)，目的在於鋼胚產生縱向彎曲時，可藉由邊導器的開閉作動對鋼胚進行方向做瞬時之調整，同時強迫修正鋼胚的胚形。在熱軋產線中邊導器的作動有位置控制模式(Position control mode, POS)與力量控制模式(Force control mode, FRC)兩種方式：

(1)位置控制模式：當鋼胚頭端到達進口端邊導器入口時，如圖 5-(a)，邊導器會先將鋼胚夾緊使鋼胚位置對中(Center)，如圖 5-(b)。當鋼胚對中後再將邊導器打開至設定之開度，如圖 5-(c)，鋼胚會持續前進進入水平軋輓內。當鋼胚頭端出水平軋輓後，出口端邊導器亦向內縮至設定之開度，現場與數值模擬中設定開度均為 10mm。

(2)力量控制模式：此模式前兩個作動步驟皆與位置控制模式邊導器作動方式相同。不同的作動機制是當鋼胚與邊導器間之作用力超過設定的壓力時，則邊導器會稍打開，使兩者間的作用力下降至設定壓力；反之若兩者間的作用力小於設定壓力時，則邊導器之開度會縮減。

四、有限元素模型

由於在軋延過程中，鋼胚同時和軋輓、輸送輓以及邊導器接觸，接觸面積較多，故本研究採用顯式積分法[10]，以減少計算時間但仍維持結果之正確性。

4.1 鋼胚模型

本研究鋼胚材料為 SAE1016 低碳鋼，以 Gleeble 鍛粗試驗機進行高溫鍛粗實驗得到溫度 1100°C，應變率為 0 至 0.5 範圍的高溫流變曲線做為數值分析計算之 SAE1016 低碳鋼材料本構曲線(constitutive curves)。如圖 6 SAE1016 低碳鋼在 1100°C 的真應力應變曲線。此外降伏應力為 23 MPa，材料

之楊氏模數為 78GPa，浦松比為 0.3。本研究由於應力應變曲線中應變硬化並不明顯故忽略軋延時的加工硬化，而針對矯正鋼胚外型做分析。

本研究之二號粗軋前鋼胚尺寸為 10 m (L) x 1.2 m (W) x 0.125m (t)；建立半對稱數值模型鋼胚厚度取實際厚度之半，0.065m。鋼胚設定為三維剛塑性模型。鋼胚長度方向網格等分切割為 1000 個元素；而厚度方向網格至少切割為 3 個元素才能探討剪力變形；軋延過程邊軋輥與邊導器持續與鋼胚兩側接觸，故鋼胚兩側容易變形，因此數值模型中在鋼胚寬度兩側網格細化。鋼胚模型共 124124 個節點，90000 個元素。在變形體上使用元素 C3D8I 進行模擬。此外配合產線之鋼胚截面形狀，驅動側(DS)較操作側(WS)厚 0.5mm，由於半對稱模型，故楔形截面的鋼胚模型驅動側較操作側厚 0.25mm。

5.2 二號平軋機和邊導器模型

為了獨立討論邊導器對鋼胚經軋延時的外形影響，本研究建立二號平軋機和邊導器模型。圖 7 為二號粗軋機示意圖，其中邊導器放置在二號平軋機前後，進口端邊導器的開度為未經軋延鋼胚的平均寬度加上 15mm，出口端邊導器的開度為經軋延後鋼胚的平均寬度加上 10mm。其中邊導器模型使用實體元素建立，二號平軋機和輸送輥則是使用剛體建立。

六、VUAMP 與 API

6.1 環境設定與介紹

ABAQUS 中使用者可以使用 Fortran 和 C++ 語言編寫各種二次開發的功能，例如在 ABAQUS 中包含許多材料庫，但使用者可利用 Fortran 自行建立材料資料，此功能在 ABAQUS 中稱為子程式。

VUAMP 為子程式其中之一，使用者可以利用 VUAMP 內建的函數進行振幅調整，而在 VUAMP 函數中有個 Sensor 功能為擷取模擬時特定節點的力量或位移，利用此功能擷取邊導器上之節點，再藉由程式的編輯輸出在振幅上來調整邊導器的開度或水平軋輥上角度的變化。圖 8 為 VUAMP 在控制邊導器之流程圖，藉由模擬當下每個

增量計算結果，VUAMP 子程式可立即擷取此刻的力量值，在經由程式邏輯運算計算出此刻的邊導器開度因該開合或閉合多少或者調整水平軋輥兩側高低，接著傳到下一個增量讓 ABAQUS 進行計算。

因此如何使用 VUAMP 以及如何利用裡面的函數截取出力量訊息為本研究重要工具之一，在 ABAQUS 中要使用子程式必須先通過用戶子程式的驗證，首先必須先安裝 Intel Fortran Compiler 與 Microsoft Visual Studio 2008 兩套軟體，安裝成功後至 ABAQUS 工作目錄下中 abq611 檔以記事本開啟，並將 Intel Fortran Compiler 與 Microsoft Visual Studio 工作目錄中 ifortvars.bat 檔與 vcvarsamd64.bat 檔的路徑貼至 abq611 中，即可將此三套軟體完成連結，開啟 ABAQUS Verification 會輸出一記事本，若裡面內容皆為 Pass 代表子程式環境設定成功，接者便可以利用 Fortran 對 VUAMP 進行編寫並且在模擬中執行 VUAMP 子程式的功能。

API 同樣為 ABAQUS 二次開發的功能之一，API 的功能是應用在 ABAQUS 的後處理上，API 的優點在於可以將繁雜的人為擷取數據利用外部程式直接將所需數據一次性擷取出來，而在 API 是利用 C++ 語言來進行編輯，因此同樣需要外界程式做為輔助，在 API 的環境設定上只需要安裝 Microsoft Visual Studio 2008，並且如上述將兩者軟體鏈結一起，即可使用 API 的功能。利用 API 擷取結果數據，格式可參閱 ABAQUS6-11 使用手冊[11]。

6.1 在 ABAQUS 中使用 VUAMP 使用者函數

軟體設定完成後，接著必須了解如何在 ABAQUS CAE 當中設定 VUAMP，首先要使用 VUAMP 子程式功能必需先至 Load 介面下中的 Tools 內找到設定 amplitude 的選項，開啟後選擇 Users，在此的 amplitude 套用在邊導器上是指開度的大小，若在水平軋輥上則是指軋輥兩側的位移。

接著至邊界條件下加入設定的 amplitude，然後開始編輯 VUAMP 子程式，利用 Sensor 的功能，對邊導器進行力量控制模式需取出口端邊導器兩側的反力或者對水平軋輥擷取兩側反力訊號來進行瞬

時調控。在 VUAMP 子程式當中，可定義去擷取歷史輸出，而歷史輸出可以監控任一節點力量訊號或位移訊號，即可利用此訊號在 VUAMP 中進行邏輯設計[12]。邏輯控制程式碼如下：

```

if (ampName(1:13).EQ.'AMP EXSG USER') then
  if (IFlagsInfo(iInitialization).eq.1) then
    ampValueNew=0
  else if (time .GT. t0ex .and. time .LT. t1ex) then
    if (time .LT. t0ex+0.1) then
      ampValueNew=ampvalueOld+(-0.045*dt/0.1)
    else if (time .GT. (t1ex-0.1)) then
      ampValueNew=ampValueOld+(0.045*dt/0.1)
    else
      if ((p3-p4) .GT. (p0ex+dp0)) then
        SGdir= 1.0
      else if ((p3-p4) .LT. (p0ex-dp0)) then
        SGdir= -1.0
      else
        SGdir= 0.0
      end if
    end if
  end if
  ampValueNew=ampValueOld+SGdir*SGGap
  Dev
end if
else
  ampValueNew=ampValueOld
end if
end if

```

過去的研究[8]切換邊導器力量控制模式時是利用 Restart 的方式，在模擬時間每 0.1 秒設定一個 Step，去觀察每一個 Step 兩側反力和是否達到 10 ton，若兩側反力和沒有達到 10 ton，則回到前一個 Step 重新調整邊導器的開度，此方式需花相當多時間來計算。而建立 VUAMP 子程式好處在於不必像過去將模擬時間每 0.1 秒就檢查邊導器兩側合力是否為 10 ton，VUAMP 會自動擷取邊導器當前的力量訊號來判別邊導器是要開還是要關，達到瞬時調控出口端邊導器，最後當 VUAMP 子程式撰寫完後只需在 Job 內的 subroutine 叫入此 Fortran 檔，即可進行模擬。

VAUMP 除了有 Sensor 的功能還可以依照現場的響應進行設定，現場力量模式邊導器是以每 0.01 秒進行一次回授控制，在 CAE 也可依照現場的方式進行設定，假設整體模擬時間為 25 秒，在 Interval 設定 2500，則在模擬中即 25/2500 秒輸出一力量訊息進行調整，藉此可以貼近現場的邊導器做動模式。

6.2 API 在 ABAQUS 中使用方式

API 為 ABAQUS 數值模擬軟體內建功能，API 可搭配 C 語言使用，藉由撰寫 C 語言，可直接讀取 ODB(結果檔)，並且藉由 C 語言可將所需結果整理，並輸出至記事本或者 Excel 中直接呈現所需結果。API 優點在於在後處理上可有效並快速進行人為繁雜的整理步驟，而使用 API 的方式須在 ABAQUS command 下輸入指令，Step1 輸入 Abaqus-j 檔名.inp 後產生結果檔，Step2 輸入 Abaqus make -j 程式碼檔名.c 在 ABAQUS 工作夾產生程式碼檔名.exe 檔，Step3 一起輸入 Abaqus 程式碼檔名.exe 及結果檔.odb，同時執行程式碼.exe 與結果檔.odb 會依照 C 語言編輯過程而產生所需檔案。

七、結果與討論

本研究依照熱軋現場建立二號粗軋機模型，並運用 ABAQUS 中使用者函數 VUAMP 置入熱軋產線中的邊導器上，實現熱軋產線上邊導器位置模式後進一步轉換成力量模式，並且探討邊導器對鋼胚的影響，探討包括鋼胚完軋後的曲率變化、邊導器的受力以及平軋機的軋延力歷程，並討論水平軋輥角度變化對鋼胚楔形截面狀況的影響。

7.1 邊導器對鋼胚之平軋模擬結果

首先針對完軋後各軋機的受力歷程與板型做探討，比較邊導器位置模式與力量模式的優缺點。圖 9 為完軋後鋼胚中心線示意圖，從圖中可以看到完軋後兩種模式的邊導器對鋼胚板形矯正狀況基本上沒有很大的差異，鋼胚頭端因為初始鋼胚的楔形量影響(驅動側較操作側厚)，經水平軋輥軋延出來後會往操作側移動。而熱軋現場邊導器與水平軋輥具有一定的距離，因此鋼胚的頭端出水平軋輥時並未能碰觸到邊導器，故無矯正效果，使得鋼胚呈現彎曲的狀態。鋼胚中段則因受到邊導器的矯正故呈現筆直的狀態。鋼胚尾端脫離邊軋機後並無拘束而呈現彎曲狀況。圖 10 為鋼胚曲率比較圖，其中明顯呈現鋼胚頭尾彎曲而中段平直的現象。其中 W/O SG 表示無邊導器。

圖 11 為鋼胚完軋後的縱向彎曲量比

較，具邊導器熱軋模型之鋼胚完軋後的縱向彎曲量僅有 6.69mm 而不具邊導器的模型則達到 27.46mm，藉由縱向彎曲量比較更能看出邊導器對鋼胚縱向彎曲矯正的效果；圖 12 為力量模式與位置模式邊導器合力歷程，力量模式邊導器的受力和都保持在 10ton 的作用力，而位置模式受力情形明顯小了許多，但完軋後的板形與縱向彎曲量並無太大差異。

圖 13 為軋延過程鋼胚中心線在軋機中的位置。若無邊導器拘束，鋼胚尾端脫離邊軋軋後會發生偏移現象；加入邊導器後，鋼胚撞擊邊導器所產生的順時針力矩會使鋼胚在軋機中產生 4mm 的偏移。這說明了雖然邊導器能夠矯正鋼胚的胚形，但仍會造成鋼胚的橫向偏移。主要因為當鋼胚脫離邊軋軋後產生橫向位移，其偏移量達到 12mm，如圖 13。由此現象也能說明邊軋軋以及中間邊導器在軋延過程限制鋼胚尾段偏移的重要功能。

接著我們從水平軋機兩側受力差(驅動側減操作側)歷程，探討影響水平軋軋軋延力差的主要因素，圖 14 為水平軋機兩側軋延力差的歷程比較，圖中 W 表示楔形量，05 則表示楔形量為 0.5mm，代表初始鋼胚驅動側較操作側厚 0.5mm。W10 則是初始鋼胚驅動側較操作側厚 1mm。

圖 14 中的(1)為鋼胚剛進入水平軋機的情況，此時鋼胚的初始楔形量對於水平軋軋初始的兩側軋延力影響最大；圖 14 中的(2)為鋼胚撞擊邊導器的區間，其中軋延力差雖然還是受到鋼胚楔形量影響，但邊導器的矯正力矩除了造成鋼胚在水平軋機下產微偏向驅動側外，也造成鋼胚驅動側厚度增加，同時也造成水平軋機的驅動側軋延力增加。最後圖 14 中的(3)為鋼胚脫離邊軋軋之後，水平軋機操作側的軋延力皆大於驅動側，造成此原因為當鋼胚脫離邊軋軋後，彎曲現象會發生在鋼胚尾端，使得鋼胚進入水平軋機時朝操作側偏移，造成水平軋機的操作側軋延力上升。由圖可歸納鋼胚偏移現象對水平軋機兩側受力不均的影響力最大，只要產生偏移，就會使水平軋機某一側軋延力上升。從以上歸納出影響鋼胚軋延力的三個因素：(1)進口楔形量、(2)邊導器拘束、(3)鋼帶側移量。

7.2 調整水平軋軋角度對鋼胚平軋之模擬

本模擬藉由比較(1)(2)兩組模型分析調整水平軋軋對鋼胚楔形量的影響，其中：

(1)鋼胚具 0.5mm 初始楔形量，軋軋無初始傾斜角度，稱為 W05。

(2)鋼胚無初始楔形量，軋軋具傾斜角度，其驅動側較操作側低 0.5mm，稱為 LV10。

圖 15 為完軋後縱向彎曲量比較圖與圖 16 為水平軋機兩側受力差歷程圖，對於完軋後的板形，與對水平軋機兩側的受力影響不論是給予水平軋軋一傾斜角，還是給予鋼胚厚度差，兩者模擬結果皆相近，這說明了在熱軋現場中鋼胚彎曲程度取決於進出口楔形率差，不管是進口胚有楔形量，或者軋軋傾斜造成，只要相同的變化率就會呈現相同側彎量並且同樣的楔形率差也對軋機兩側受力造成相同情況。

以上分析皆發現不論是進口胚有楔形量或者軋軋傾斜，對於完軋板型、水平軋機兩側受力以及邊導器矯正的機制都相近，兩組模擬唯一的不同在於楔形量的變化。綜合以上結果，推斷出影響楔形量最大的因素為水平軋軋的角度變化，而影響縱向彎曲量最大的因素為邊導器的矯正，因此若要達到最小縱向彎曲量與楔形量，必須同時調整軋軋與邊導器才能達成。

八、結論

1. 本研究成功應用 ABAQUS 數值模擬軟體中使用者函式功能(VUAMP)於位置控制模式邊導器與力量控制模式邊導器在模擬過程中開度的動態控制，並且分析軋延過程鋼胚的路徑及形狀變化，並比較兩種邊導器模式的特點。
2. 邊導器透過 VUAMP 調整數值增量之增加範圍與頻率達到更精準的迴授控制，並利用此控制邏輯方式實際套用在軋延產線，降低邊導器磨耗，增加軋延品質及產率。
3. 邊導器矯正鋼胚時會改變鋼胚在水平軋軋處的流動行為，抑制伸長量較大的一邊，使其材料流動往寬度方向流動，因此中間板形才能變得直，但邊

導器矯正時會在軋輥處產生些微的偏移現象，而影響鋼胚較大的偏移是脫離邊軋輥後，所以對於熱軋產線上中間邊導器對鋼胚尾端矯正非常重要。

4. 從調整水平軋輥傾斜角與給予鋼胚楔形量兩組模擬結果歸納，唯一差異在於楔形量，因此說明影響楔形量最大的因素為軋輥角度的變化，而從縱向彎曲量的結果比較，影響縱向彎曲量最大因素為邊導器的矯正。

九、參考文獻

- [1] ABAQUS User's Manual, Version 6.11.
- [2] Nilsson, *FE simulations of camber in hot strip rolling*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 80, pp.325-329, 1998.
- [3] 何純玉、吳迪、趙憲明, *中厚板軋製過程橫向厚度的計算方法*, 東北大學學報, Vol. 30, No. 12, 2009
- [4] 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. 徐星杓, 鋼胚熱軋製程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.
- [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. 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] 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.
- [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] 許涵劄, *側導板對熱軋鋼胚形狀影響之研究*, 國立中正大學機械工程研究所碩士

論文, 2010.

- [9] 戴瑋廷, *邊導器機構矯正鋼胚熱軋變形之模擬分析*, 國立中正大學機械工程研究所碩士論文, 2011.
- [10] 任雅嵐, *ABAQUS 實務入門引導*, 全華圖書股份有限公司, 2007.
- [11] 吳博山, 周釋善, *鋼鐵材料手冊修訂版*, 中國材料科學學會, 1998.
- [12] 林俊諺, *利用邊導器與水平軋輥之動態調整矯正熱軋板型之模擬分析*, 國立中正大學機械工程研究所碩士論文, 2012.

十、圖片

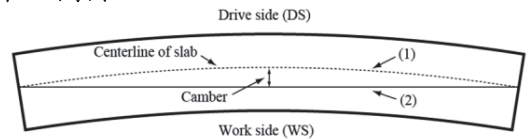


圖 1 鋼胚縱向彎曲示意圖(上視圖)(1)為裁減後鋼胚寬度中心線,(2)為鋼胚頭端及尾端原始寬度中心點的連線

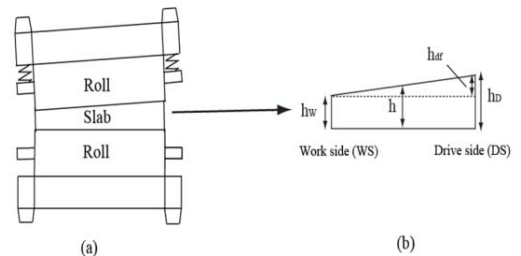


圖 2 楔形截面示意圖

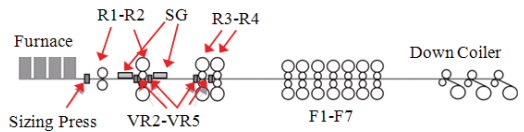


圖 3 熱軋加工流程圖

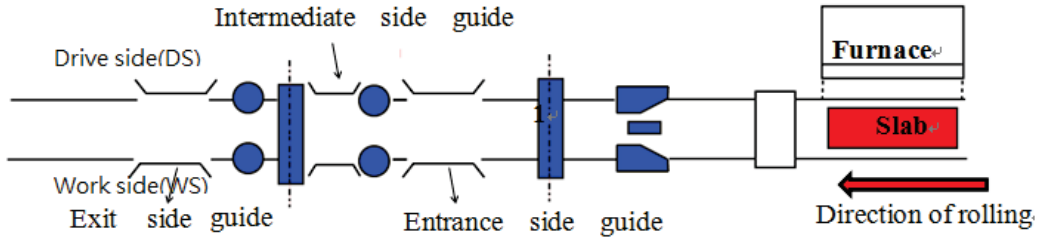


圖 4 二號粗軋機上邊導器的安置位置(上視之示意圖)

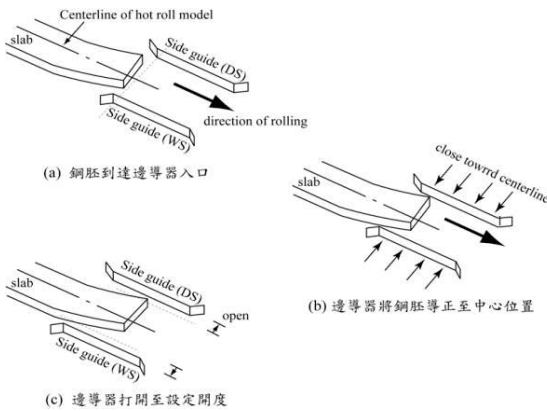


圖 5 控制邊導器作動方式之示意圖

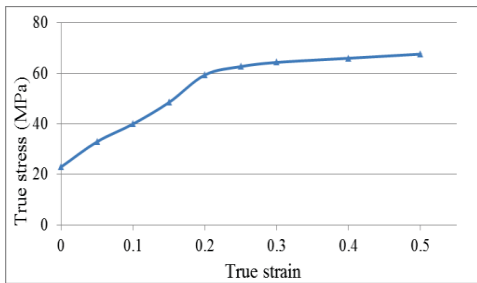


圖 6 SAE1016 低碳鋼在 1100°C 的真應力應變曲線

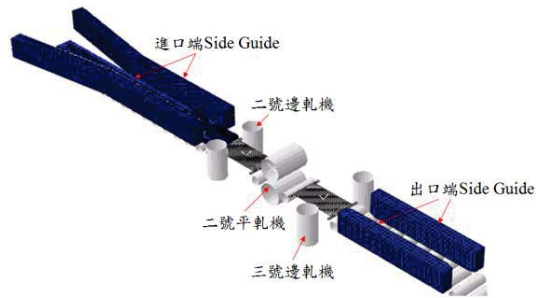


圖 7 二號粗軋機製程及邊導器機構模型示意圖

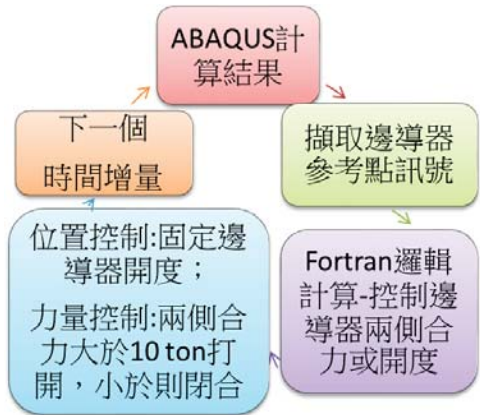


圖 8 VUAMP 在控制邊導器之流程圖

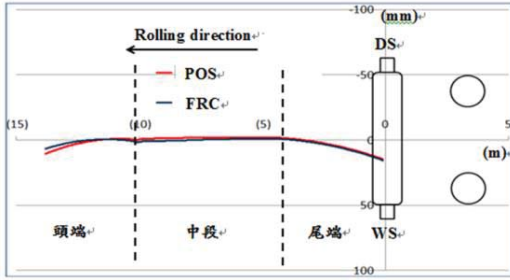


圖 9 完軋後中心線路徑圖

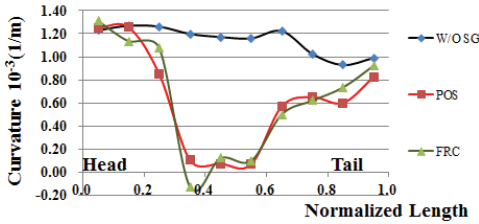


圖 10 力量模式與位置模式鋼胚曲率比較圖

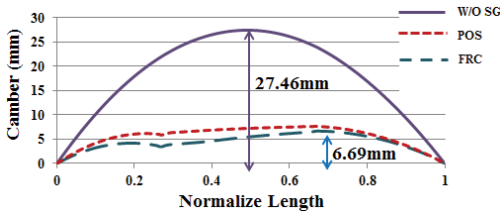


圖 11 力量模式與位置模式完軋後縱向彎曲量比較

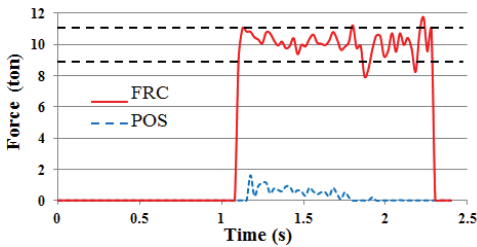


圖 12 力量模式與位置模式邊導器合力歷程

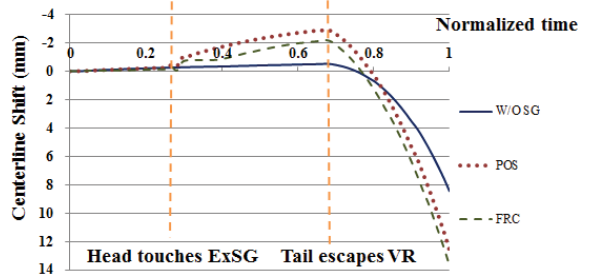


圖 13 鋼胚在水平軋機下中心線偏移的位置

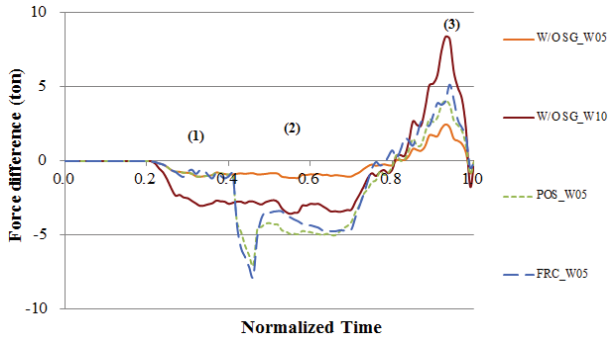


圖 14 水平軋機軋延力差(WS-DS)的歷程比較

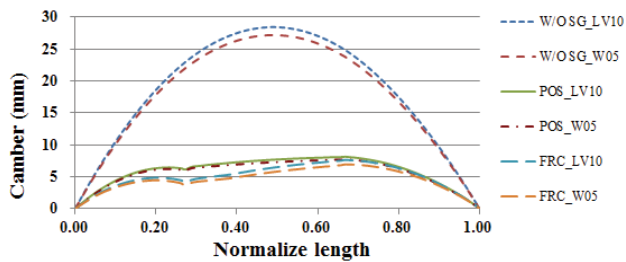


圖 15 完軋後縱向彎曲量比較圖

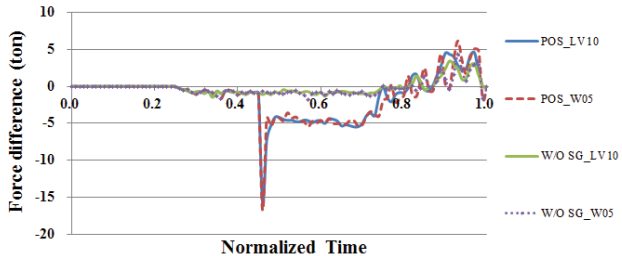


圖 16 水平軋機兩側受力差(WS-DS)歷程圖