

## 鋼胚粗軋上下軋輥非對稱摩擦條件對胚型之影響

敖仲寧<sup>1</sup>、連凱泓<sup>2</sup>、彭葦濟<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副研究員

E-mail: imejna@ccu.edu.tw

### 摘要

在熱軋連續製程中，水平軋輥持續承受高溫磨耗，導致上下軋輥之間的非對稱軋延狀態。非對稱軋延可能會影響軋延的穩定性並造成鋼胚打滑，並導致鋼胚的不良形變而降低良率。由於熱軋現場的工作溫度很高，直接量測軋輥與鋼胚之間的接觸條件及為困難，因此本研究利用數值模擬的方式，探討非對稱軋延條件對軋輥扭矩、軋延力、鋼胚應力分佈狀態與軋延後鋼胚曲率等的影響。

本研究利用有限元素軟體 ABAQUS 依照熱軋產線操作條件建立熱軋模型，而此研究需要模擬多組軋輥摩擦條件，為到此目的，使用數值模型之 INP 檔案直接修改上下軋輥與鋼胚間之摩擦係數進行批量模擬，並配合 Python 語言，擷取模擬結果檔案中所需要之數據，如軋延扭矩、軋延力鋼胚節點座標等。模擬結果顯示，鋼胚曲率與上下軋輥摩擦係數差成正比，軋延力隨著軋輥與鋼胚間摩擦係數增加而增加。

**關鍵字：**熱軋製程、有限元素分析、非對稱性軋延、摩擦係數、軋輥軋延力、軋輥扭矩、鋼胚曲率

### ABSTRACT

Hot rolling is a continuous thermo-mechanical process. The roller surface undergoes a high temperature wear process during rolling. This may result in asymmetric friction conditions between upper and lower rolls. The asymmetric rolling conditions may affect the stability of rolling and lead to slipping of slab which causes irregular deformation and would seriously affect the quality of slab and reduces the yield rate. This work applied a two-dimensional model with elastic rollers to analyze hot rolling process using ABAQUS and to study the effect of asymmetric friction coefficients between the rollers and steel slab on rolling torque, rolling force, stress distribution and slab distortion. The simulation result shows that the distortion of slab is proportional to the friction coefficient between rollers and slab. Rolling force increases with increasing friction coefficients. The stress in slab deformation zone increases with increasing friction coefficients and the rolling neutral point is shifted toward entrance of roll bite as the friction coefficients increase.

**Keywords:** Hot rolling, asymmetric rolling, friction coefficient, rolling force, rolling torque, curvature, reduction

### 一、緒論

傳統熱軋延加工(Rolling)由多組轉向相反的軋輪連續軋軋，軋輥利用與材料間的摩擦力將鋼胚引入軋輥間。在加工的過程中材料持續性的產生塑性變形。

在軋延過程的軋延穩定性對於產品良率極為重要。不當的操作因素可能會造成鋼胚打滑、翹曲，進而干擾連續軋延製程。而上下軋輥之周速比、輥徑比、兩軋輥的表面粗糙度、軋輥位置皆為潛在的影

響因素[1][2][3]。

若要直接在生產線上探討軋軋的表面粗糙度對軋延的影響，必須將生產線獨立出來作為研究用途，並且需要測試多種摩擦條件。但如此不僅造成材料的浪費也會影響到生產線的運作而耗費巨大的成本。因此本研究利用有限元素軟體 ABAQUS 建立二維彈性軋軋模型[4]，並依照熱軋鋼廠粗軋區生產線之實際製程參數，探討非對稱軋延中各項因素對軋延力和扭矩之影響及其塑性變形之機理。

## 二、文獻回顧

### 2.1 軋軋製程相關模擬

Markowski[5]等人採用有限元素軟體“Elroll”分析非對稱軋延問題，並發現影響板材曲率大小和方向的因素包含有上下軋輪半徑比、切線速度比、上下軋輪摩擦係數比以及板材裁減率。

Gao[6]等人建立冷軋延之數學模型分析非對稱軋延，研究中發現上下軋輪摩擦係數不同但總和相同時，剪切變形區之長度會隨著上下軋輪摩擦係數比增加而增加，若固定一軋之摩擦係數，則上下軋輪摩擦係數比增加的同時軋制力也會增加；若當上下軋輪摩擦係數總和為定值時，軋延力會隨著摩擦係數比增加而降低，但下降幅度並不大。

### 2.2 非對稱摩擦條件軋延之研究

Johnson[7]以鉛為材料進行非對稱軋延的實驗探討上下軋輪之周速比、軋徑比及兩軋輪之表面粗糙度不同，對軋延力、軋延扭矩與板材曲率的影響。實驗結果顯示，當兩軋輪的表面粗糙度相同時，軋延後之板材的彎曲方向皆朝向周速低的軋輪；當兩軋輪的表面粗糙度不同時，板材彎曲的方向及曲率大小則與軋輪之周速比、縮減率及表面粗糙度有關。若上、下軋輪之軋徑相同，而下軋輪較粗糙且縮減率小時，板材彎曲方向往下軋輪方向彎曲。

Lenard[8]以實驗探討不同的摩擦係數對於低碳鋼軋延的影響，研究中使用六種不同的潤滑液，軋機裁減量分為 15%與

50%兩組。發現到軋輪的表面速度與軋延扭矩成反比，但是影響並不大；而摩擦係數則與軋輪的表面速度成反比，在較低的裁減量下更為明顯。

Pospiech[9]使用鋁板研究非對稱軋延之板材曲率，在定量的研究上，他發現當上下軋輪之軋徑與周速相等（即對稱軋延的條件），但板材和上、下軋輪的接觸摩擦條件不均時，裁減率之大小將影響板材曲率的方向；且因上下軋輪之潤滑條件的差異將對板材的曲率產生明顯的影響。

## 三、有限元素模型

研究探討軋延製程中影響軋延扭矩之參數，因此需要大量模擬不同參數並比較。為了節省模擬時間，使用二維模型以取代三維模型。此模型由上下水平軋輪、輸送板組成，如圖 1 所示，然後將各零件依照產線位置結合邊界條件組成符合產線的數值模型。在建立零件時皆會在剛體上建立一參考點(Reference point, 簡稱 RP)以輸出軋延力及軋軋扭矩。

水平軋輪由 175mm 的剛性核心與厚度 325mm 的彈性外殼組成，因此其總半徑為 500mm。由於軋延時軋輪變形集中於軋輪與鋼胚接觸區域，將軋輪中心設定為剛體可有效減少模擬時間。軋輪開度為 70mm，輸送板的起始位置為下軋輪軸心上方 480mm 處。鋼胚厚度為 100mm，而軋延裁減量為 30mm。

實際鋼胚全長為 25m。由於本研究只探討鋼胚通過水平軋輪到進入軋延穩定狀態之間的區段，僅有鋼胚前端產生變形，因此對鋼胚前端 400mm 部分進行網格細化。前端長度方向網格等分切割為 100 個元素；而厚度方向網格為 8 個元素。鋼胚模型總計 1782 個節點、1584 個元素。

## 四、結果與討論

### 4.1 非對稱摩擦係數對軋延力的影響

$\mu_T$  表示上軋輪與鋼胚之間之摩擦係數， $\mu_B$  為下軋輪與鋼胚之間之摩擦係數。 $\mu_T$  與  $\mu_B$  的設定範圍為 0.15 至 0.5。非對稱

摩擦係數對軋延力的影響如圖 2 所示。圖中可發現當  $\mu_T$  為 0.15 到 0.35 時，軋延力會隨著  $\mu_B$  增大而增加。當  $\mu_T$  為 0.4 到 0.5 時，軋延力會先隨著  $\mu_B$  增大而增加，在  $\mu_B$  為 0.3 時達到最大值，之後則隨著  $\mu_B$  增大而下降。當  $\mu_B = \mu_T$  時，軋延力曲線中出現一反曲點。

#### 4.2 非對稱摩擦係數對軋延力之影響

非對稱摩擦係數對軋延力的影響如圖 3 所示。當  $0.15 \leq \mu_T \leq 0.25$  且  $\mu_B \leq 0.30$  時，上軋延力不隨  $\mu_B$  變動，而當  $0.3 \leq \mu_T \leq 0.5$  且  $\mu_B \leq 0.30$  時，上軋延力隨  $\mu_B$  增加而減少。再圖 4 中發現到類似的趨勢，下軋延力在  $0.15 \leq \mu_T \leq 0.25$  且  $\mu_B \leq 0.30$  時不隨  $\mu_B$  變動，而當  $0.3 \leq \mu_T \leq 0.5$  且  $\mu_B \leq 0.30$  時，下軋延力隨  $\mu_B$  增加而增加。

圖 5 為非對稱摩擦係數與軋延力之和(上軋延力加下軋延力)之間之關係，由曲線的分佈，可以發現  $\mu_T$  與  $\mu_B$  的變化對上下軋延力的影響並不大，其最大值與極小值相差不超過 7%，表示改變上下軋延力的摩擦係數並不會影響到整個軋延的總軋延力，會影響到的是上下軋延力占總軋延力之比例，摩擦係數較大側則軋延力較大；摩擦係數較小側則軋延力較小。

#### 4.3 非對稱摩擦係數對鋼胚軋延後彎曲的影響

鋼胚軋延後的上彎及下彎以曲率表示。模擬結果顯示在非對稱軋延條件下，鋼胚軋延後通常會往摩擦係數較大側之軋延彎曲。圖 6 顯示非對稱摩擦條件對鋼胚頭端曲率之影響。上彎定義曲率為正；下彎定義曲率為負。結果顯示鋼胚曲率與上下軋延力摩擦係數差 ( $\Delta \mu = \mu_T - \mu_B$ ) 成正比。當對稱摩擦條件  $\mu_T = \mu_B$  時，鋼胚軋延後呈直線狀態(曲率為零)。

#### 4.4 上下軋延位置之影響

在此區討論三種情境：

1. 上下軋延初始位置 ( $\Delta d = 0$ )
2. 上下軋延上移 10 mm ( $\Delta d = 10$ )
3. 上下軋延下移 10 mm ( $\Delta d = -10$ )

$\Delta d$  為鋼胚中心線與軋機中心線之垂直距離，圖 7 顯示上下軋延上移 10 mm 之軋延與鋼胚之相對位置，此時鋼胚中心線是低於軋機中心線，故鋼胚頭端下方會先碰觸到下軋延表面，再藉由下軋延的帶動進入軋機進行厚度裁減。

圖 8 為上下軋延上移 10 mm 時鋼胚達到穩定軋延之應力分佈。從圖中鋼胚先接觸下軋延再被上下軋延咬入，與輸送板有一很小的夾角，但由鋼胚應力分佈可看出軋延狀況呈現上下對稱且穩定，離開軋機之鋼胚亦無彎曲。

圖 9 顯示上下軋延下移 10 mm 之軋延與鋼胚之相對位置，此時鋼胚中心線是高於軋機中心線，故鋼胚頭端上方會先碰觸到上軋延表面，再被上軋延帶動進入軋機。而此時上軋延對鋼胚施以力矩，迫使鋼胚頭端在進入軋機前向下彎曲。圖 10 為上下軋延下移 10 mm 時鋼胚達到穩定軋延之應力分佈，顯示鋼胚在軋延後向下彎曲，此現象必然會影響軋延力、軋延力矩、以及鋼胚曲率。

#### 4.4.1 軋延力與軋延高度之關係

圖 11 為當軋延上移時非對稱摩擦條件對軋延力之影響，與圖 2 比較後發現到軋延力與原始軋延位置情形下比較並無明顯差異，故軋延上移對軋延力和影響有限。

圖 12 為當軋延下移時非對稱摩擦條件對軋延力之影響，同樣與圖 2 比較後，發現到軋延下移會使整體的軋延力略有下降。因軋延下移後，鋼胚在進入軋機前會先碰觸到上軋延，如圖 9 所示。鋼胚在進入軋機時輸送板仍然持續給予鋼胚一向上的正向力，能分擔軋延中下軋延支撐鋼胚之重量，故整體軋延力會有下降之趨勢。

#### 4.4.2 軋延力矩與軋延高度之關係

圖 13 顯示當軋延上移時非對稱摩擦條件對上軋延力矩之影響，與圖 3 初始位置之結果比較後，兩組模型的上軋延力矩是相近的，圖 14 顯示當軋延上移時非對稱摩擦條件對下軋延力矩之影響，再與圖 4 初始位置之結果比較後，兩者也是非常

接近。軋輥上移與初始位置模型的軋延力、扭矩皆無差別，表示上移對軋延造成的影響很有限。

圖 15 為當軋輥下移時非對稱摩擦條件對上軋輥扭矩之影響，與圖 3 初始位置之結果比較後，可以發現到軋輥下移後上軋輥的扭矩會增加，且上軋輥扭矩也隨著上軋輥與鋼胚間摩擦係數  $\mu_T$  增加而提升。這是因為軋輥下移後鋼胚頭端會先碰觸到上軋輥，上軋輥一方面須承受支撐鋼胚的輸送板所產生的反作用力外，另一方面要用軋面與鋼胚接觸面之摩擦力將鋼胚順利帶進軋機。比較圖 8 與圖 10 也能發現到軋輥下移後鋼胚與上軋輥之接觸面積也增大，故上軋輥的扭矩會增加。

圖 16 為當軋輥下移時非對稱摩擦條件對下軋輥扭矩之影響，與圖 4 初始位置之結果比較後，可以發現到扭矩有下降的趨勢。上下軋輥扭矩和是維持在一定值。

#### 4.4.3 鋼胚曲率與軋輥高度之關係

圖 17 為當軋輥上移時非對稱摩擦條件對鋼胚頭端曲率影響，與圖 6 初始位置之結果比較發現軋輥上移之結果與軋輥在初始位置之結果相似。

圖 18 為當軋輥下移時非對稱摩擦條件對鋼胚頭端曲率影響，顯示軋延後鋼胚曲率最接近平直並不再上下軋輥摩擦係數相等時，如  $\mu_T=0.35$  時鋼胚曲率最小會發生在  $\mu_B=0.30$ ，原本在此摩擦係數組合下鋼胚經軋延後會上翹。比較圖 18 與圖 6，可發現到當  $\mu_B$  大於  $\mu_T$  時，比起圖 6 鋼胚向下彎曲的幅度會增加； $\mu_T$  大於  $\mu_B$  時，鋼胚向上彎曲的幅度會減小。

#### 4.5 應用不對稱摩擦條件與不同軋輥位置修正鋼胚軋後外型

從前述結果可以發現到上下軋輥之摩擦條件與不同軋輥位置會使鋼胚軋延後彎曲。反過來說，當鋼胚出現彎曲，則可以利用上述兩條件校正鋼胚軋後之外型。為了證實此想法，本研究建立非對稱軋延邊界條件模型，以  $\mu_T=0.35$ 、 $\mu_B=0.2$  製造鋼帶軋後上彎的條件，如圖 19，並藉調整軋輪位置正鋼帶彎曲外型，如圖 20 所示。模擬結果顯示，當調整軋輥位

置下移 17mm 時，鋼胚在軋延後呈現幾乎水平之狀態，如圖 21。

由此結果可以歸納，藉 ABAQUS 建立虛擬之軋機，除了能夠解析軋延製程之變形現象之外，亦可配合模擬結果，找出優化製程之方法，提升產能。

### 五、結論

1. 本研究利用有限元素模擬軟體 ABAQUS 探討鋼胚及上下軋輥表之間的非對稱摩擦條件對於軋延之影響，模擬結果顯示非對稱摩擦係數對軋延力及軋輥扭矩的影響趨勢，鋼胚經軋延後皆會往摩擦係數較大側彎曲，且鋼胚軋後之曲率大小與上下軋輥間摩擦係數差成正比。
2. 軋輥上移對於軋延結果並無影響；而將軋輥下移會因為輸送板的影響，造成整體軋延力及下軋輥扭矩下降，而上軋輥扭矩則增加。鋼胚在軋延後當  $\mu_B$  大於  $\mu_T$  時鋼胚向下彎曲的幅度增加；當  $\mu_T$  大於  $\mu_B$  時，鋼胚向上彎曲的幅度減小。

### 六、參考文獻

- [1] W. Johnson and G. Needham, "An Experimental Study of Asymmetrical Rolling", Applied Mechanics Convention, Cambridge, Instn. Mech. Engrs. 180, pp. 270-281, 1966.
- [2] W. Johnson and G. Needham, "Further Experiments in Asymmetrical Rolling", International Journal of Mechanical Science, 8, pp. 443-455, 1966.
- [3] J.G. Lenard. "Friction in cold rolling of a low carbon steel with lubricants", J. M. Vol. 99, pp. 86-93, 2000.
- [4] ABAQUS User's Manual, Version 6.11.
- [5] Markowski, H. Dyja, M. Knapinski and A. Kawalek, "Theoretical analysis of the asymmetric rolling of sheets on leader and finishing stands", Journal of Materials Processing Technology. Vol. 138, pp. 183-188, 2003.
- [6] H. Gao, S.C. Ramalingam, G.C.

Barber and G. Chen,” Analysis of asymmetrical cold rolling with varying coefficients of friction”, Journal of Materials Processing Technology 124, pp. 178–182, 2002.

- [7] W. Johnson and G. Needham, ”Further Experiments in Asymmetrical Rolling”, International Journal of Mechanical Science, 8, pp. 443-455, 1966.
- [8] J.G. Lenard. ”Friction in cold rolling of a low carbon steel with lubricants”, J. M. Vol. 99, pp. 86-93, 2000.
- [9] J. Pospiech, ” A Note on the Influence of Some Factors Affecting Curvature in the Flat Rolling of strip” Journal of Mechanical Working Technology, 15, pp. 69-80, 1987.

七、圖片

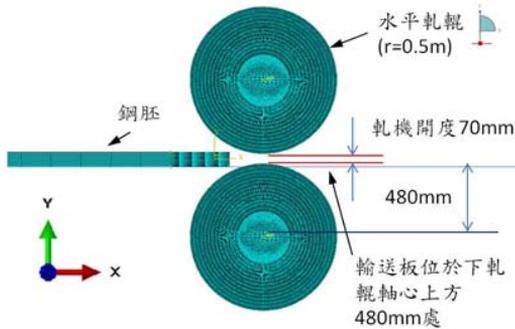


圖 1：二維彈性軋輥模型

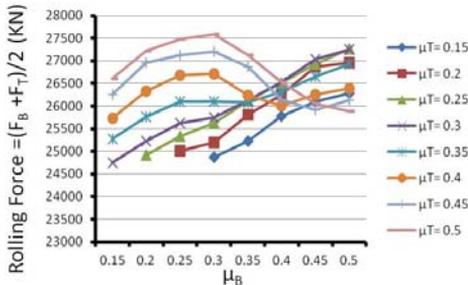


圖 2：非對稱摩擦係數對軋延力之影響，裁減量 30%

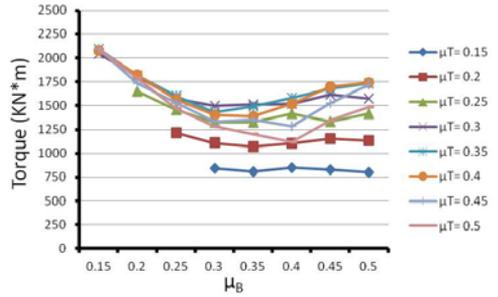


圖 3 非對稱摩擦係數對上軋輥扭矩之影響，裁減量 30%

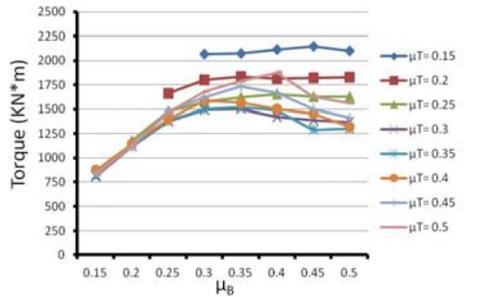


圖 4：非對稱摩擦係數對下軋輥扭矩之影響，裁減量 30%

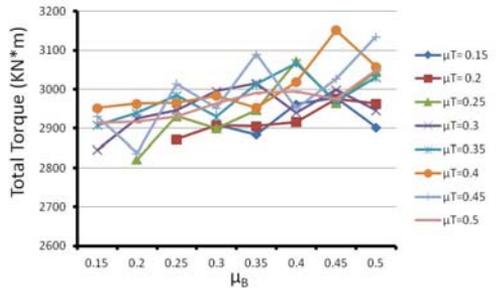


圖 5：非對稱摩擦係數對上下軋輥扭矩和之影響，裁減量 30%

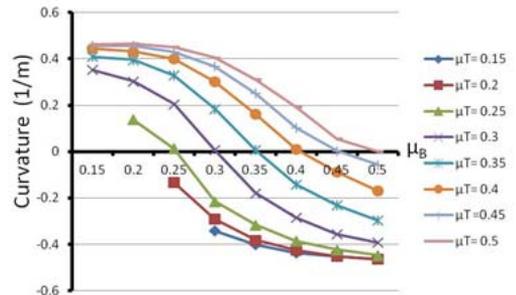


圖 6：非對稱摩擦係數對鋼胚曲率之影響，裁減量 30%

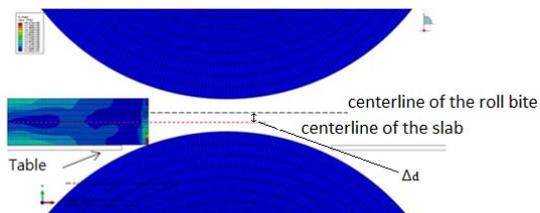


圖 7：軋輥上移 10mm，鋼胚與軋輥之相對位置關係(t=0.04s)

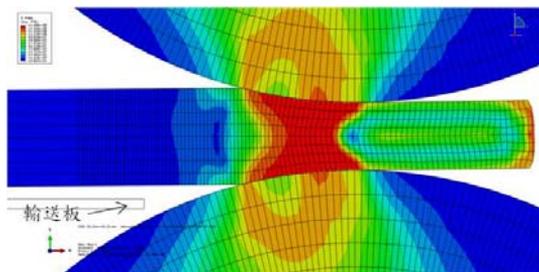


圖 8：軋輥上移 10mm，鋼胚達穩定軋延狀態之 Von Mises 應力分布( $\mu_T = \mu_B = 0.3$ )

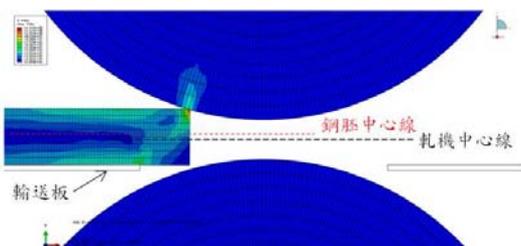


圖 9：軋輥下移 10mm，鋼胚與軋輥之相對位置關係(t=0.06s)

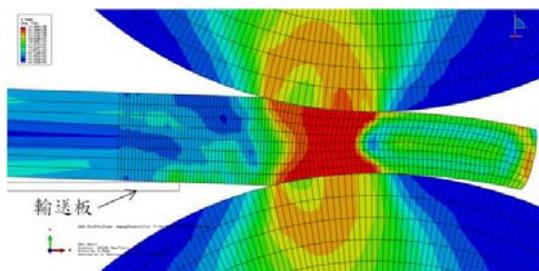


圖 10：軋輥下移 10mm，鋼胚達穩定軋延狀態之 Von Mises 應力分布( $\mu_T = \mu_B = 0.3$ )

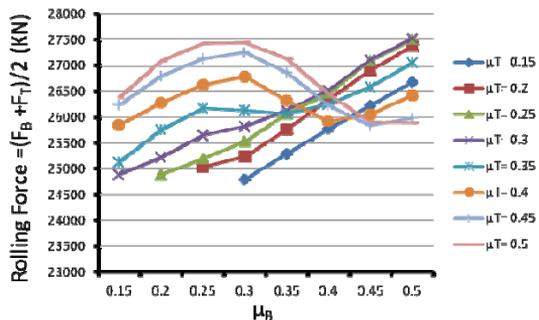


圖 11：軋輥上移 10mm，非對稱摩擦係數對軋延力和之影響

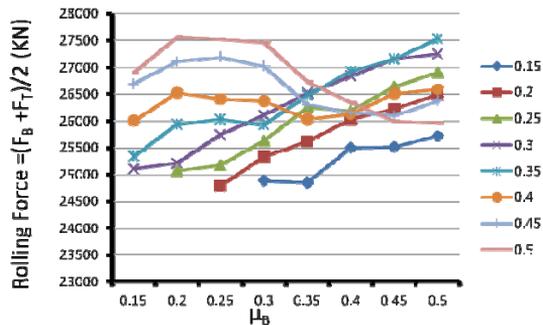


圖 12：軋輥下移 10mm，非對稱摩擦係數對軋延力和之影響

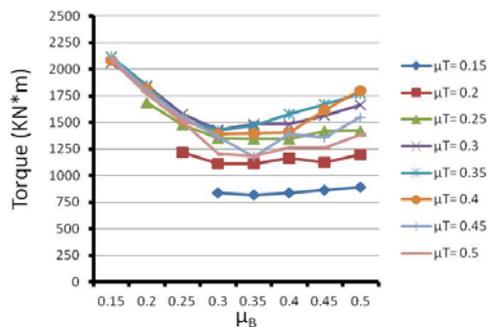


圖 13：軋輥上移 10mm，非對稱摩擦係數對上軋扭矩之影響

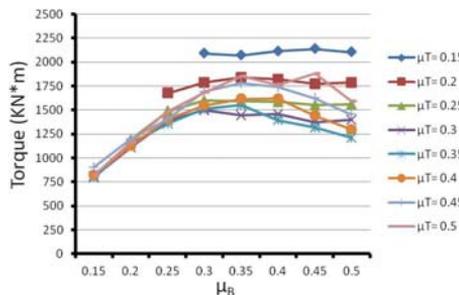


圖 14：軋輥上移 10mm，非對稱摩擦係數對下軋扭矩之影響

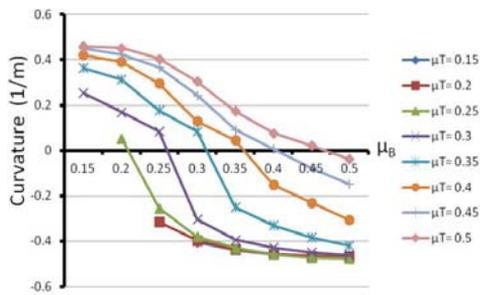


圖 18：上下軋輥下移 10mm 後上下軋輥摩擦係數組合對鋼胚曲率之影響

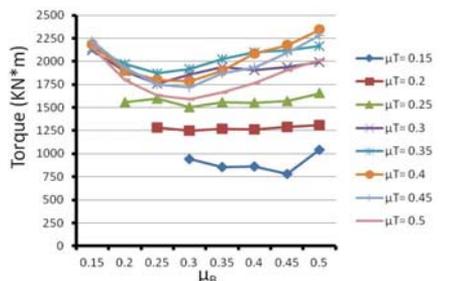


圖 15：軋輥下移 10mm，非對稱摩擦係數對上軋扭矩之影響

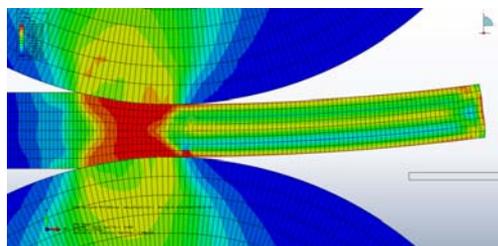


圖 19：鋼胚達穩定軋延狀態之 Von Mises 應力分布( $\mu_T=0.35$ 、 $\mu_B=0.2$ )

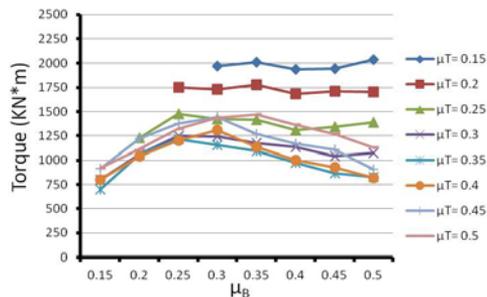


圖 16：軋輥下移 10mm 後軋輥摩擦係數組合對下軋扭矩之影響

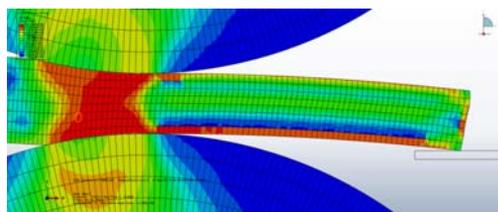


圖 20：軋輥上移 17mm，鋼胚達穩定軋延狀態之 Von Mises 應力分布( $\mu_T=\mu_B=0.2$ )

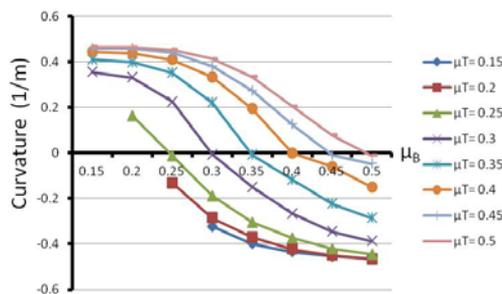


圖 17：上下軋輥上移 10mm 後上下軋輥摩擦係數組合對鋼胚曲率之影響

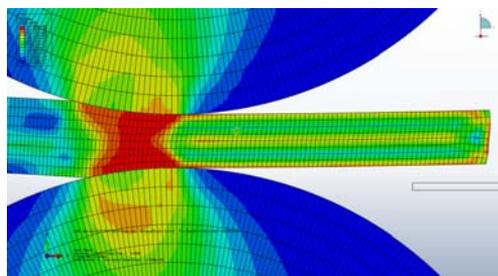


圖 21：軋輥上移 17mm，鋼胚達穩定軋延狀態之 Von Mises 應力分布( $\mu_T=0.35$ 、 $\mu_B=0.2$ )