

精軋不對稱邊界條件對鋼帶運動影響

敖仲寧¹, 許涵劄², 邴軍程³, 陳明發⁴

服務單位

¹中正大學機械學系教授

²中正大學機械學系博士生

³中國鋼鐵股份有限公司鋼鋁研發處副研究員

摘要

在精軋產線中鋼帶的厚度較薄，當鋼帶尾端具不對稱外形時，撞擊邊導器容易翻起造成產品以及產線機構之損壞，現場對此的解決方法為調整軋輥 level 產生側向力使鋼帶中心線往軋機中心線移動，減少中心線偏移。精軋區中軋機除了可藉人為調控 level 來修正鋼帶軋延過程不對稱行為外，軋機與軋輥的組裝間隙也是影響鋼帶軋延的因素之一。組裝間隙若控管得當可以避免中心線偏移量的加劇，減少發生鋼帶尾端撞擊的可能性，目前現場的控管規範為根據現場經驗長期觀察所制定。為了探討精軋區軋輥 level 和軋機組裝間隙兩樣重要因素對精軋過程鋼帶運動與板形的影響，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精軋模型。在 level 的探討方面，建立精軋第一至四站軋機數值模型和尾端彎曲之鋼帶，設定不同軋輥 level、鋼帶尾端彎曲量、軋延區形狀參數進行軋延模擬，探討各站不同 level 對軋輥兩側軋延力差、鋼帶尾端中心點偏移、鋼帶運動行為。再結合不同鋼帶尾端彎曲量、軋延區形狀參數的模擬結果，歸納出各站鋼帶側偏變化量與軋輥 level、鋼帶中心線偏移量、軋延區形狀參數的關係式。在組裝間隙的探討方面，藉由改變上下軋輥相對位置，分析各組軋輥相對位置的徑向和軸向間隙情形，分析各組數值模型鋼帶軋延之軋輥兩側軋延力差、鋼帶尾端中心點偏移、鋼帶運動行為。藉由探討徑向、軸向間隙和鋼帶軋延的關係以供後續研究進行邊界條件的設定。

關鍵字：熱軋精軋、尾端彎曲、中心線偏移、軋輥軋縫差、組裝間隙

ABSTRACT

If the strip has an asymmetrical profile, it is easy to crash the side guide and make the production line damage during rolling process. The solution is to adjust the leveling to force the strip motion center line deviation and correct the strip to center of the mill. Apart from adjusting the leveling to correct the strip asymmetrical behavior in rolling, the assembly gap between rolling mill and roll is the factor of influencing the rolling result. If the assembly gap control well, it can avoid the increment of center line deviation and reduce the possibility of tail pinch. The current on-site control regulations are based on long-term observations with the on-site experience.

In order to investigate the effect of the assembly gap in rolling mill and the leveling in the finish rolling. In this study, the finite element software ABAQUS is used to construct the hot rolling mill model according to the operating conditions of hot rolling production line. We mainly discuss the influence between leveling, differential force, the deviation of the end of the strip, the strip motion and combine with the simulation results of different hook, rolling zone shape parameter, leveling to summarize the deviation of strip variation function. By discussing the relationship between radial, axial assembly gap and the simulation results of strip rolling, we can make sure the boundary conditions for future research. From the simulation we can conclude the effect of asymmetry boundary condition during rolling process.

Keywords: hot rolling, finish mill, hook, side walk, leveling, assembly gap

一、緒論

精軋為熱軋製程的最後一道軋延步驟。由於鋼帶精軋時厚度相對較薄，其抗彎曲及挫屈能力大幅下降，因此，若軋延邊界條件稍有不對稱，就可能導致鋼帶出現不良形變，如中波(center buckle)、邊波(edge wave)、翹曲或側向彎曲(camber)等狀況，除了影響產品品質外，亦可能造成軋延過程出現不穩定的運動現象，導致鋼帶撞擊產線設備，影響生產線壽命與產值。因此，軋延邊界條件的對稱性，是維持精軋品質的關鍵。

為了要了解軋機不對稱邊界條件對軋延的影響，本研究主要使用有限元素軟體 ABAQUS 建立精軋模型，並分別分析軋機 level 與軋機組裝間隙兩種精軋不對稱條件對鋼帶運動的影響。

二、精軋製程介紹

熱軋精軋製程之工作原理是讓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，用以改變材料厚度或橫截面形狀的加工方法。

精軋區之軋輥一般有 6~8 座，其鋼帶的厚度約為 40mm 至 1mm。由於軋延過程之鋼帶流動體積須維持恆定，因此精軋區的鋼帶軋延速度很高，最快可以達到每秒十幾公尺以上。為了要穩定軋延過程鋼帶的動態行為，熱軋線在兩座精軋機間設置 Looper 機構，當鋼帶通過時撐起鋼帶[1]，如圖 1 與圖 2，並且配合前後精軋輥的輥速維持鋼帶張力以提供軋延穩定性。

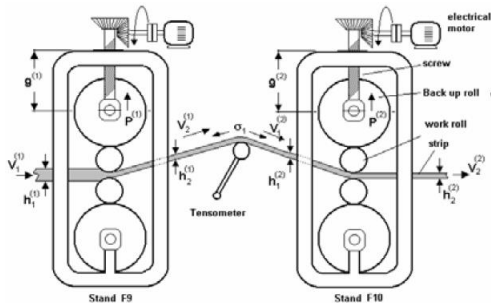


圖 1 精軋機與 Looper 示意圖[1]

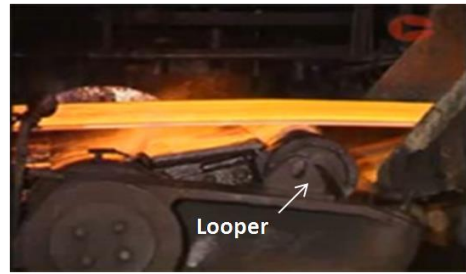


圖 2 Looper 機構

三、精軋不對稱邊界條件

3.1 精軋 level 設定

軋機的 level 是人為可設定的軋延操作參數，其定義為工輥之驅動側(DS)與操作側(OS)之油壓尺垂直方向距離差，也就是軋機兩側的輥縫差，如圖 3。在軋延過程中，level 值會因為 OS 側與 DS 側的軋延力差與軋機鋼性所產生改變，亦可以藉由人為或程式設定進行調整。Level 調整的方式是利用軋輥兩側的油壓系統與作用力感測器，藉由施加力量使軋輥兩側下壓量產生差異。軋輥的 level 會造成兩側輥縫出現差異，連帶改變兩側裁減量平衡。因為 level 設定而傾斜的軋輪會在軋延過程中產生側向力推移鋼帶往輥縫較大側移動，而兩側的裁減量差亦會使鋼帶彎向裁減量較小側(輥縫較大側)。因此，熱軋線的精軋製程常用調整 level 的方式來控制鋼帶的側偏運動。

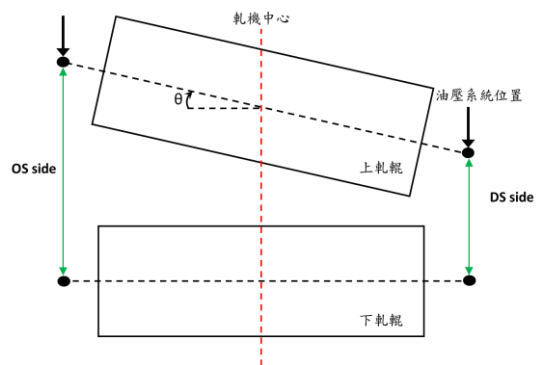


圖 3 精軋機 level 設定示意圖

3.2 精軋組裝間隙介紹

為了將軋機組順利組裝至 Housing 中，軋機組之零件尺寸會小於 Housing 內壁耐磨墊約 1~2mm，因此在軋延過程中，支撐軋軛的 Chock 會頻繁與 Housing 中的耐磨墊摩擦，久而久之造成兩側間隙大小不等，影響軋延過程鋼帶之運動行為。圖 4 與圖 5 為 Housing 與軋機間隙位置示意圖，組裝間隙共分三個方向，分別為軋延方向間隙 16 個(圖 4)、軸向間隙 8 個(圖 5)、和垂直方向 2 個，共 26 組間隙。經由熱軋現場之統計，定期替換耐磨墊後，鋼帶的運動不穩情況確實大幅減少，因此可以肯定，Housing 與 Chock 的間隙問題是影響鋼帶運動的關鍵原因之一。在本研究中，僅針對不對稱的間隙邊界條件進行討論，研究不對稱邊界條件對鋼帶運動之影響。

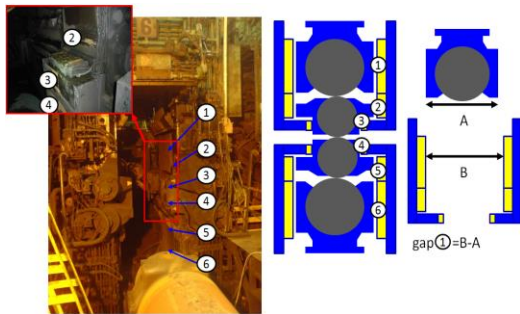


圖 4 軋機之軋延方向組裝間隙

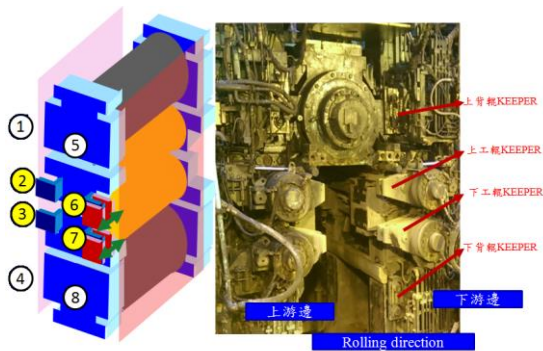


圖 5 軋機之軸向組裝間隙

四、文獻回顧

鋼帶運動行為是熱軋製程中常見的技術問題，但由於其發生機理相當複雜，因此相關的研究文獻十分有限。Matsumoto 等人(1996,1999,2002)[2]提出「一般化二維理論

模型」，並利用簡化的二維熱軋模型，以數值方法模擬複雜的材料側向流動行為，成功地預測鋼帶的側向滑移及碰撞行為。Kiyota 和 Matsumoto(2003)[3]參考上述理論模型，以「線性二次型最佳控制理論法」對鋼帶的側向滑移行為進行抑制，有效降低鋼帶尾端偏擺的幅度及撞擊的次數。綜整以上以及目前多數發表的論文，鮮少針對不同軋延參數對鋼帶運動之影響進行分析，因此本研究利用 ABAQUS 建立分析工具，分析不對稱邊界條件對鋼帶運動之影響。

五、有限元素模型

5.1 鋼帶模型

本研究依照熱軋線實際的量測值建立鋼帶模型，其中鋼帶模型選用元素為 C3D8I，由於精軋過程鋼帶長度長達 100m 以上，不可能以全尺寸進行有限元素分析，因此，本研究只取鋼帶尾端 2 公尺進行建模與模擬。鋼帶寬度為 1.2m，厚度則依照熱軋線各精軋站進行設定。除此之外，為了研究軋機的不對稱邊界條件對鋼帶軋延穩定性的影響，本研究給與鋼帶一尾板彎曲外形，其彎曲量為 35mm，如圖 6。材料選用 SAE1016，其材料參數如表 1，應力應變曲線如圖 7。

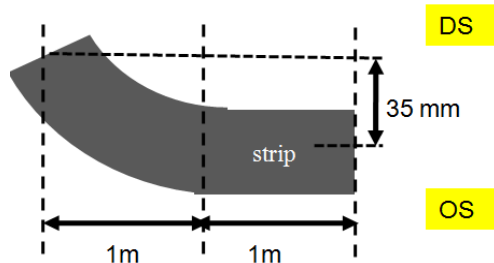


圖 6 具縱向彎曲結構之鋼帶模型示意圖

鋼帶材料(SAE1016)	
密度(ρ)	7850 kg/m ³
傳導性	29.7 J/m-s-K
膨脹係數	1.02×10 ⁻⁵ 1/°C
彈性模數(E)	68.9 GPa
波松比(ν)	0.3

表 1 鋼帶之材料參數

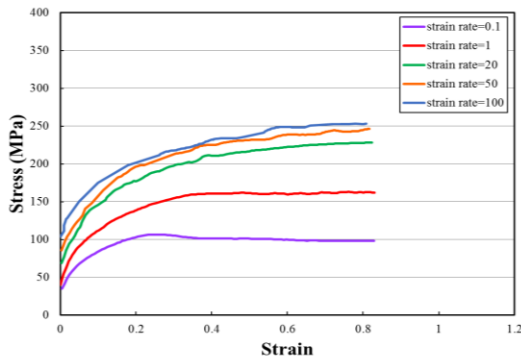


圖 7 SAE1016 於 900°C 流變應力曲線

5.2 精軋 level 模型

本研究之精軋 level 模型分成軋軛、邊導器、及輸送板，如圖 8。其中，軋軛外形為圓柱狀，長度為 2.03m、直徑 0.726m，使用元素為 Discrete rigid 剛體元素，其功能為裁減鋼帶厚度與矯正鋼帶外型。邊導器長度為 1.3m、高度 1m 並給予邊導器兩側具 1.1m 及 14° 的導角，使用 Analytical rigid 剛體元素。輸送板長度 18m、寬度 2m、厚度 0.004m，使用 Discrete rigid 剛體元素，其功用純粹為支撐鋼帶。本研究的軋軛 level 設定可參考表 2，其各站軋機分別模擬 level 0mm 至 0.4mm 四個數值，並分析 level 對鋼帶動態的影響。

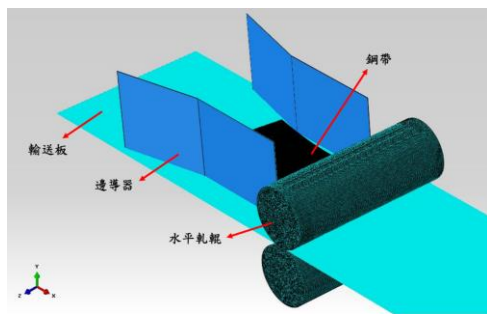


圖 8 精軋機模型

Level=OS gap – DS gap	上軋軛旋轉角 θ
0.0 mm	0°
0.1 mm	0.0021°
0.2 mm	0.0042°
0.4 mm	0.0084°

表 2 level 設定參數

5.3 精軋組裝間隙模型

本研究將精軋組裝間隙模型以有限元素中的 connector 單元進行替代，其設定方法如圖 9。在軋軛兩側各設定四的 RP 點(參考點)，如 RP1~RP4，將 RP1 與 RP3 和軋軛連結，當作是圖 9 中的 Chock 與軋軛組合體，並將 RP2 與 RP4 位置固定住，當作是圖 9 中的 Housing 邊界位置。以此方式可以在 RP1 與 RP2 間設定”stop”功能，也就是限制兩點間的相對位移在設定之固定值內，以達到精軋間隙問題之模擬效果。

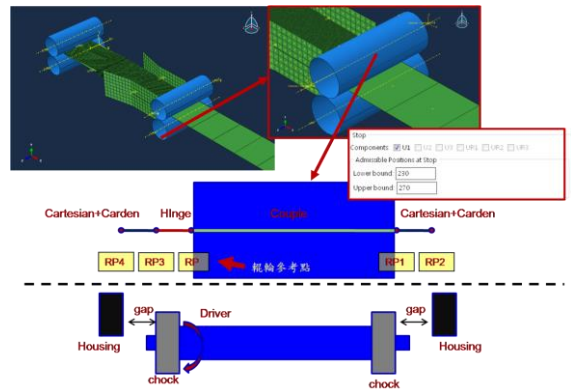


圖 9 組裝間隙設定方法

六、模擬結果分析

6.1 精軋 level 對鋼帶運動影響

本研究分別分析鋼帶於不同精軋站別，不同 level 設定時的軋後鋼帶中心線外型變化，其模擬結果如圖 10 至圖 13。圖 10 為精軋第一站在不同 level 下，軋後鋼帶中心線的外型。在軋延前鋼帶前段 1m 的中心線偏移量是 0 mm，只有尾段 1m 有縱向彎曲；軋延後由於鋼帶受到軋機 Level 的作用，矯正了鋼帶尾端的側偏使尾端往 OS 移動。而鋼帶頭端由於有邊界條件的拘束只會往軋延方向移動，因此軋後鋼帶頭端的中心線還是和軋機中心維持在同一條線上。當軋機設定之 level 值時，除了頭端外其餘整段鋼帶的中心線會往 OS 偏移，隨著軋機 level 的增加鋼帶往 OS 的側移量也越多。圖 11 至圖 13 為第二站至第四站的鋼帶中心線外型變化，從各站軋後中心線外型可得知 level 增加可以矯正鋼帶中心線位置，且隨著 level 值從 0mm 增至 0.4mm，尾端中心會越靠近軋機中心。道次越往後鋼帶厚度越薄，在設

定相同軋機 level 下鋼帶中心線移動的量也越多。

將精軋前後四站之 level 淨修鋼帶尾板側篇正值與其所對應的軋機 level 整理後可以繪製出圖 14。從圖中可觀察到，隨著 level 值的增加鋼帶尾端的修正量也越多。由於後幾站鋼帶軋延的厚度越來越薄，在設定相同軋機 level 值下所能修正的縱向彎曲量也較多。而在同一站精軋機中，軋機 level 值與鋼帶尾端的修正量呈線性的關係。

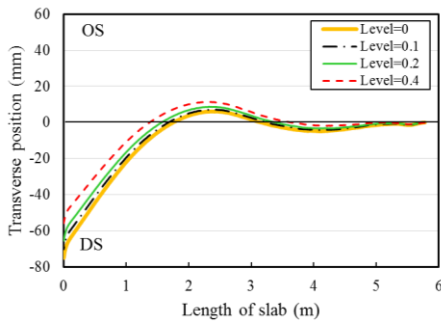


圖 10 精軋第一站不同 level 軋後鋼帶中心線外型

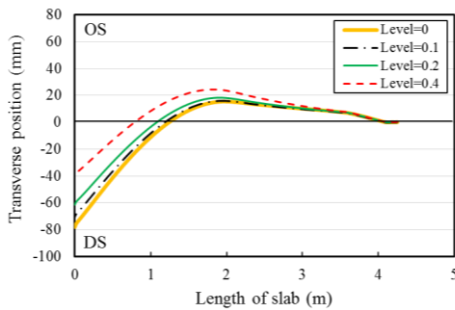


圖 11 精軋第二站不同 level 軋後鋼帶中心線外型

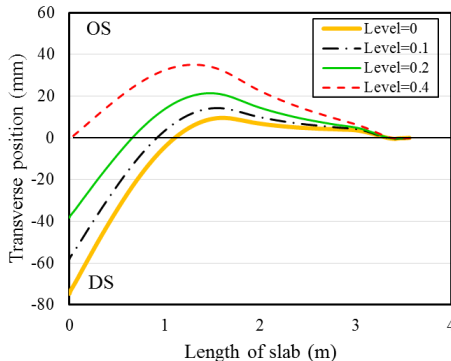


圖 12 精軋第三站不同 level 軋後鋼帶中心線外型

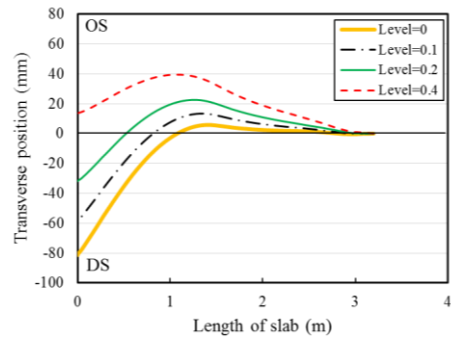


圖 13 精軋第四站不同 level 軋後鋼帶中心線外型

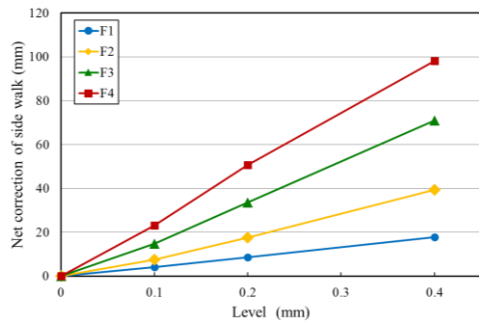


圖 14 各站軋機 level 值與鋼帶中心線尾端側偏修正量關係圖

6.2 不對稱組裝間隙對鋼帶運動影響

為了研究精軋組裝間隙不對稱對鋼帶運動穩定性的影響，本研究分別給予軋機三個不對稱的間隙邊界條件。其中於 case1 中上下軋輥完全不具軋機組裝間隙，意即軋延過程中軋輥完全維持水平狀態，如圖 15；case2 給予上軋輥一個不對稱的組裝間隙，使的在穩態軋延過程中，上軋輥會因為間隙而產生傾斜的狀況，如圖 16；而 case3 則同時給予上下軋輥不對稱邊界條件，使軋延過程上下輥輪同時傾斜，如圖 17。模擬結果可見，當邊界條件完全對稱時(case1)，鋼帶經過邊導器時並無大幅翻起的情況發生；若軋機因組裝間隙而出現不對稱的情況時，其鋼帶在軋延過程就會受到側向力推擠，因而撞擊邊導器導致鋼帶出現翻起的不穩定運動狀況。圖 18 為三個 case 邊導器的受力歷程，可以看到邊導器的受力大小分別為 case3 最大，case1 最小，依此可證明軋機間隙不對稱狀況會影響軋延過程的穩定性。

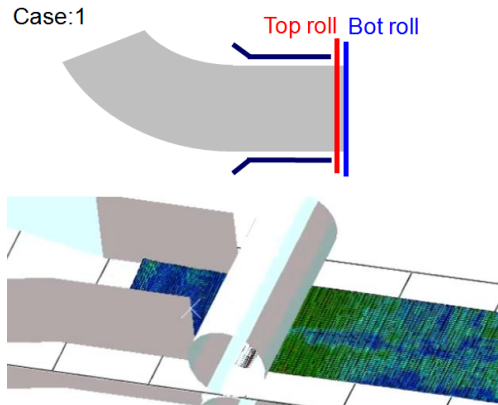


圖 15 軋輥對稱對鋼帶運動之影響

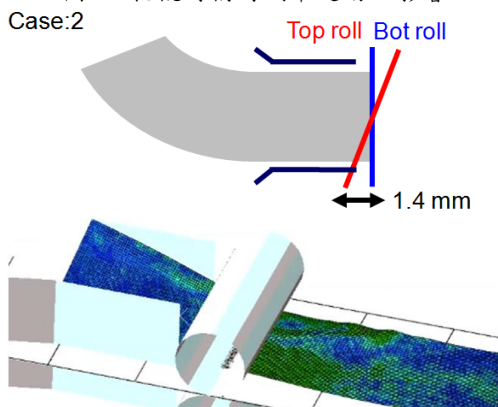


圖 16 上軋輥不對稱對鋼帶運動之影響

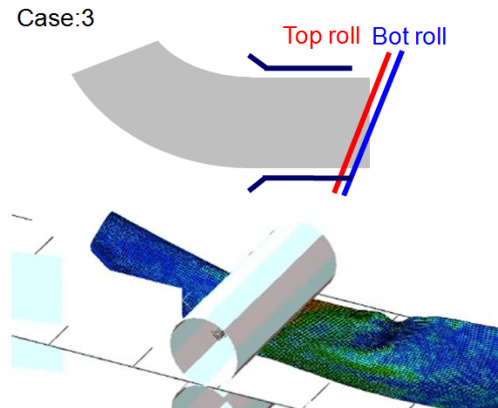


圖 17 上下軋輥不對稱對鋼帶運動之影響

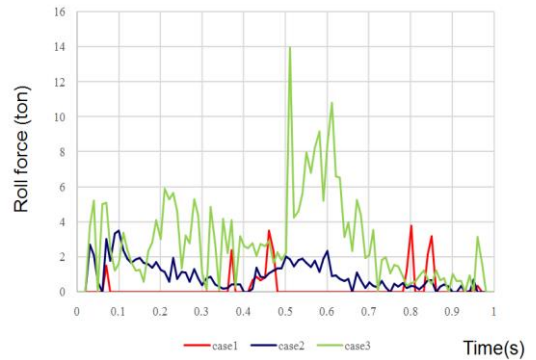


圖 18 軋機不對稱對邊導器受力歷程影響

七、結論與未來展望

- (1) 本研究依照熱軋線實際狀況，建立縱向彎曲鋼帶有限元素模型，並藉由鍛粗實驗找出低碳鋼流變曲線。
- (2) 本研究建立熱軋精軋模型，並分析不同精軋道次與不同 level 值設定對鋼帶運動之影響，其結果顯示隨著 level 值的增加，鋼帶尾端的側偏量也越多。在同一站精軋機中，軋機 level 值與鋼帶尾端的修正量呈線性的關係。
- (3) 本研究應用 connector 元素建立精軋組裝間隙模型，並分析不同間隙不對稱狀況對鋼帶運動之影響。模擬結果顯示，間隙不對稱狀況會使鋼帶軋延時發生側偏並撞及邊導器翻起，影響鋼帶的運動穩定性。

八、參考文獻

- [1] F.G. Rossomando J. D. F., Modeling and Control of a Hot Rolling Mill. Latin American Applied Research 2006, 36, pp.199-204.
- [2] Matsumoto, H., 2001. What can be analysed by the rapid version of the generalized 2-dimensional theory. In: The 4th Rolling Symposium, Pohang, Korea, 2001.
- [3] Kiyota, T., Matsumoto, H., Adachi, Y., Kondo, E., Tsuji, Y., and Aso, S., 2003. Tail crash control in hot strip mill by LQR. In: Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado, June 4-6, 2003.