

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 計畫名稱：行星式軋軋機軋軋成形之有限元素分析研究

The finite element deformation analysis on planetary rolling process

計畫編號：NSC-88-2212-E-009-003

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：洪景華 交通大學機械系 教授

### 一、中文摘要

現今一般的不鏽鋼材質的線材與棒材的製造，大部分以二重式軋機來加工。通常需要數座的粗軋機粗軋至一定尺寸才進行最後的精軋。為了節省生產成本，提升生產效率，現已有業者引進行星式軋軋機來進行單道次高減縮率之粗軋加工。同時為了提高附加價值，亦逐漸應用其於高合金含量之不鏽鋼棒材的加工上，但在此過程中，出現了許多製程上的困難，急須加以研究解決。

因此，本研究計畫運用有限元素模擬的方法，來探討行星式軋軋的成型過程，以解決行星式軋軋機在生產特殊鋼材時工件扭曲變形的情形。研究中考慮了軋輪的外型，及其置放時的壓下角、偏置角等參數，以建立適當的行星式軋軋的模組。再運用三維彈塑性有限元素分析法，對應生產時的狀況，加入適切的邊界條件、材料性質完成了初步的模擬，並觀察了工件變形及應力、應變的分佈情形。

本計畫希望藉此初步的研究成果，對行星式軋軋機的製程有更進一步的了解，並依此作為接下來一系列分析工作，包括最佳化設計，工件及軋輪的材料性質分析等的依據，以求解決生產高合金含量的不鏽鋼材生產的瓶頸。

**關鍵詞：**軋軋，行星式軋軋，不鏽鋼，有限元素法，最佳化設計。

**Abstract**

Most of modern stainless steel rods are manufactured by 2-high rolling mills. In the roughing rolling process, several 2-high rolling mills are usually needed to produce the semi-finished shapes. For saving production cost and increasing yield rate, certain company has invested in using high-reduction planetary rolling mill (HRM or PSW) for single pass rough rolling. This new type of rolling mill has also been used on the rolling of high-alloy-contained stainless steel rods for higher added value. However, several difficulties have occurred during the manufacturing process and solutions are urgently needed.

This project focused on solving the problem of the seriously twisted workpiece during planetary rolling process on certain special steels. Therefore, the basic geometric model of planetary rolling mill that includes roll profiles and offset angle of the rolls were constructed at first. In addition, the three-dimensional elastic-plastic finite element simulation was used to analyze the deformation characteristic of the process and the stress and strain distributions on workpieces.

From above analysis, we have gathered basic understandings on the rolling process using planetary rolling mill and have established the bases for the future works including optimization design and material

properties analysis. We expect this series of research will be helpful in solving the problems in producing special steels with PSW.

**Keyword** : rolling, planetary rolling mill, stainless steel, finite element analysis, optimization design

## 二、緣由與目的

傳統的碳鋼棒材，在粗軋階段通常利用數座的二重式粗軋機，將進料鋼胚加工至精軋機可以進行加工的尺寸。不過對高合金含量的不鏽鋼而言，多採用三重軋軋機或是行星式軋軋機來生產。國內的某特殊鋼材公司引進了行星式軋軋機，來作為其生產特殊鋼材的加工機具。行星式軋軋機（PSW: Planetenshragwalzwerk）的引進，可以取代傳統二重式軋軋機六至八部，將原來需要數道手續的粗軋過程，只需一次的加工就可以完成。因其減縮率大的特性，又稱作高壓縮軋軋機（High Reduction Mill, HRM）。此機器的引進，使進料鋼胚的尺寸彈性增大、來源增加、加工時期軋軋的負載小、材料的橫向延展低[1][2]、整根材料的頭尾端溫差小等等的條件均有利於提高成品的精度與品質的均勻性，提升產品的競爭力。

該公司在生產合金含量較低的不鏽鋼時，順利的使用行星式軋軋機來進行鋼材的生產。唯在生產高合金含量的不鏽鋼 308 309 時，遭遇到了生產上的瓶頸。進料鋼胚不易被軋輪咬入，易發生打滑的現象。而一旦可順利咬入，經軋延後的鋼材表層又會產生一道道的螺紋般裂痕，狀似麻花。經初步的分析，此一問題的範圍涵蓋了不鏽鋼材本身之熱處理與金相的分析，以及軋輪本身的外型以及材質的選擇。不鏽鋼材與軋輪間的關係，則與軋延過程中，鋼材所承受的應力與應變關係來決定。因此本研究計畫，嘗試以有限元素分析的方法，對軋延的過程進行初

步模擬，以求增進對此成形過程的瞭解，作為一系列分析研究的基礎。

## 三、研究方法

在本研究中，首先將建立行星式軋軋系統的幾何模型。行星式軋軋機主要是由三個軋輪所組成的。三個軋輪以對稱狀傾斜置放，軋輪的中心軸與工件的中心軸以一偏置角(offset angle)交錯。此一偏置角使軋輪轉動時帶動工件向前。參考廠商的資料，以及已有的文獻[3]，先行以兩個直線段來描繪基本的軋輪外型，建立第一個軋輪，再依序建立另外兩個軋輪。在建構整個行星式軋軋的模組時，因軋輪與工件間呈歪斜交錯狀，故採用座標轉換的方法，將建構好的軋輪從以軋輪為準的座標系，轉換到以工件為準的座標系，依此建立整個分析時的網格系統。

三軋輪外有一環固定其位置，運轉時與軋輪公轉方向相反，狀似行星式齒輪運轉的情形，故稱之行星式軋軋機。外環除了有固定三個軋輪的位置的功能外，其主要目的也在修正鋼材於軋軋時因受軋輪作用所生之扭曲變形，使鋼料加工後仍能維持圓棒形。在模擬時，為求簡化模組，外環的迴轉作用將不加以考慮，同時，也不考慮三個軋輪的公轉，亦即固定三個軋輪的位置，使其只有自轉；如此，在這樣的邊界條件下，工件將被視為一自由轉動的物體。

在粗軋階段，不鏽鋼材料是處在 $1000^{\circ}C$ 以上的高溫下，因此工件的材料性質也是必須加以考慮的。就可以找到的文獻資料[4]，在此初步模擬的階段，將採用 304 不鏽鋼，在 $1000^{\circ}C$ 下的等效應力等效應變曲線，如圖一所示，作為帶入 Dyna3D 模擬時的材料性質。

## 四、結果與討論

圖二是建立完成的行星式軋軋的網格系

統包括了工件以及三個輓輪。

經初步的模擬後，我們發覺輓輪與工件一開始接觸咬合的面積大小將會影響整個的軋延製程。需讓工件與輓輪的接觸面積擴大，輓輪才能夠靠著咬合面的摩擦力帶動工件前進；為改進此一缺點，運用齒輪創成的方法，藉由嚙合方程式 (meshing of equation) [5]，配合輓輪的配置，找出工件與輓輪之間接觸的關係，使得工件與輓輪一開始的接觸面積增大，運用這方法，藉由已有的輓輪形狀，可得知工件與輓輪接觸時的型態，或亦可以依工件預成型的形狀，求出接觸面最大的輓輪形狀。圖三則是所採用的輓輪外型依此方法所創成出工件外型。

在經過輓輪的軋軋成形後，工件的變形情況如圖四所示。可以觀察的到，工件受到輓輪帶動的影響，產生了扭曲的情形。再觀察工件的剖面圖，更可發現扭曲的情形，嚴重到幾近九十度。而這將會是接下來急需加以研究改善的課題。此外，還可以觀察到，金屬材料內外的流動速度不一，造成工件前端有凹陷的情形產生，這是因工件外圍受到輓輪的帶動，使得外圍材料流動的速度快過於工件內部的流動速度。

圖五是工件上某一節點，在軋軋變形時的軌跡圖。可以發現工件上任一點的運動軌跡是成螺旋狀的。也驗證出了工件與輓輪接觸變形的情形和嚙合方程式所求得的工件創成外型是類似的。圖六為工件軋軋成形後的應力以及應變分佈圖。由圖可看出工件一開始與輓輪接觸，開始要變形時，所受到的應力是最大的。但隨著變形量的增大，應變增大，應力將稍微的減小。

## 五、計畫結果自評

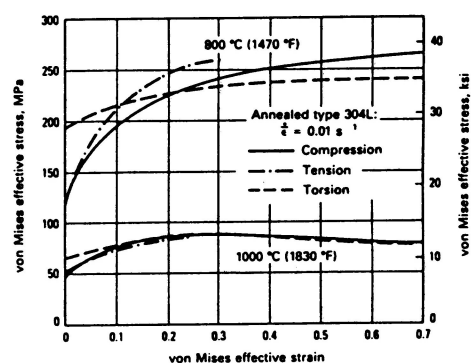
本年度的研究計畫，已經完成了行星式輓軋的模組，確立了建構整個模組的程序。也經由初步的模擬確定了行星式輓軋過程的

模擬程序，修改模擬的邊界條件以及初始的狀況。同時也應用了嚙合方程式，嘗試找出工件與輓輪接觸情形，並經由模擬驗證了此一現象。本計畫的結果指出了需要再加以研究解決的課題，並且提供了接下來進一步研究的基礎，此使得我們可以考慮不同的製程參數，針對高合金含量不鏽鋼的材料性質，進行最佳化製程的模擬分析。

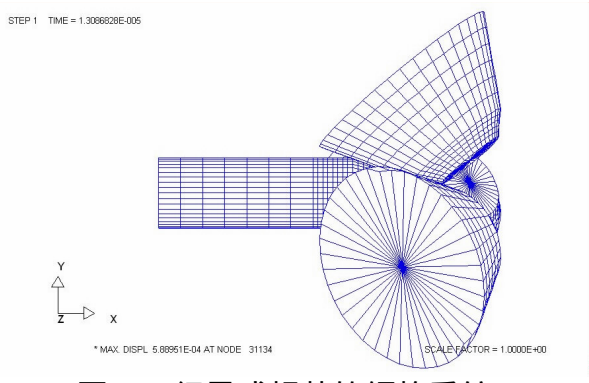
## 六、參考文獻

1. Ammerling, W. J., et al., "Application of 3-roll technology for rolling specialty rod and bar products", Iron and steel Engineer.
2. Ammerling, W. J., et al., "The Kocks 3-roll technology for high precision specialty rod and bar product". MPT-Metallurgical Plant and technology. No. 6/89, pp14-19.
3. 李毓傑, "行星式三輓輪高縮減壓延機壓延製程之彈塑性有限元素法分析", 1995, 國立中山大學機械系碩士論文。
4. Howard E. Boyer, Atlas of stress-strain curves, ASM International, Metals Park, OH, 1987, p299, p301
5. Litvin, F. L., "Gear Geometry and Applied Theory", Prentice Hall, 1994

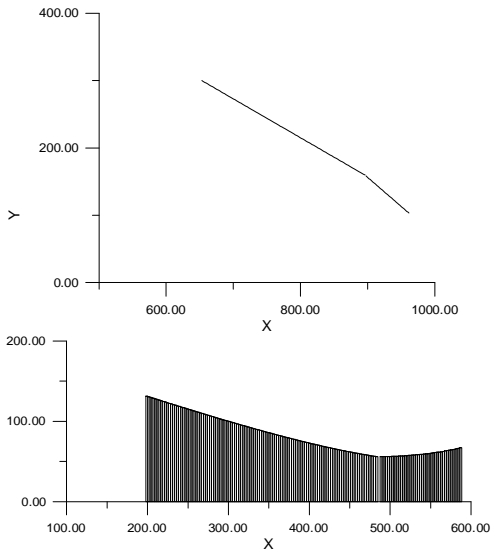
## 七、圖表



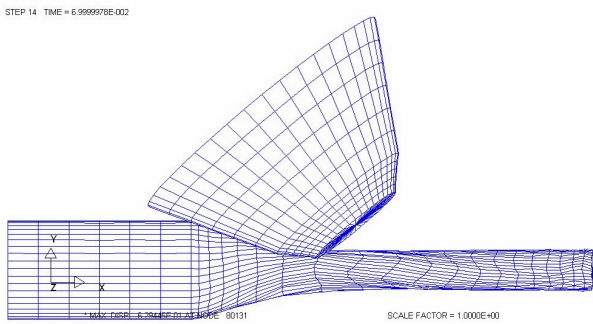
圖一、304 不鏽鋼的材料性質



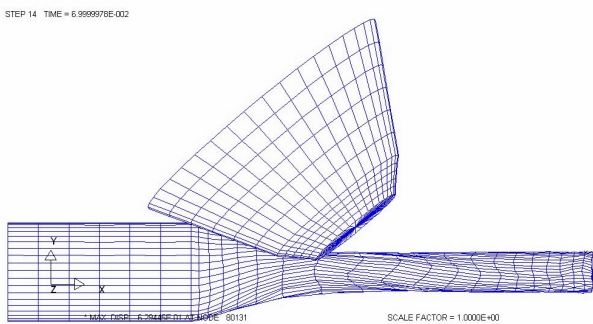
圖二、行星式軋軋的網格系統



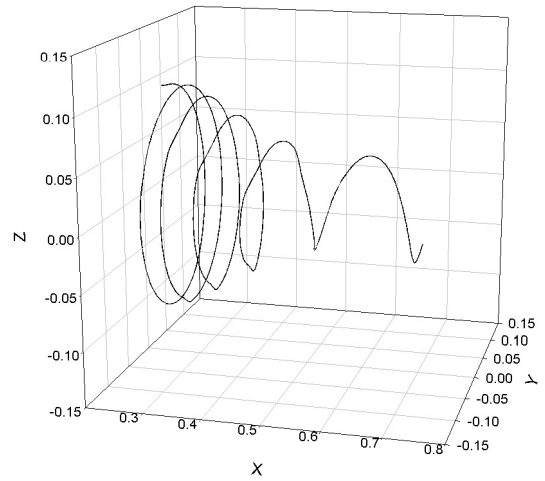
圖三、軋輪外型及其創成出的工件外型



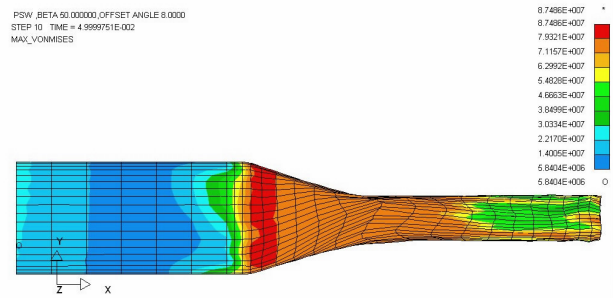
圖四 (A) 工件變形圖



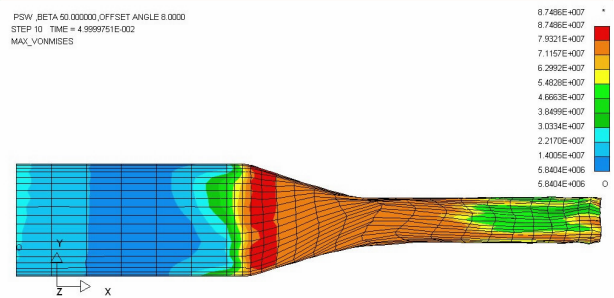
圖四 (B) 工件剖面圖



圖五、節點運動軌跡圖



圖六 (A) von Mises 應變分佈圖



圖六 (B) 應力分佈線圖