

# 混合物理與數值模擬於異質材料溫鍛製程發展之研究

## Study of hybrid physical and numerical simulations for warm forging development of different materials

白好馨<sup>1\*</sup>、李榮顯<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學機械工程研究所

<sup>2</sup> 國立成功大學機械工程研究所

\*E-mail: <sup>1</sup>philosopher0123@icloud.com、<sup>2</sup>mersl@mail.ncku.edu.tw

### 摘要

本研究以異質材料—不銹鋼 SUS304 與鈦合金 Ti-6Al-4V 進行混合物理與數值模擬，而後驗證比對模擬結果，確認模型之真實性與適用性後，便藉由此模型探討鈦合金 Ti-6Al-4V 製程參數對溫鍛製程之影響。

為了能夠針對難以鍛造又缺乏實際生產經驗的鈦合金 Ti-6Al-4V 進行溫鍛製程規劃與改善，本研究混合了物理模擬與有限元素數值模擬兩種模擬方式產生新興的模擬架構。此模擬方式是先利用業界常用的模型材料不銹鋼 SUS304 進行物理模擬的實驗，確立整體溫鍛製程的實驗架構，並了解實際製程參數的控制方式，再建立模型材料不銹鋼 SUS304 溫鍛製程之有限元素數值模型，以其實驗與模擬結果進行比對驗證，確立有限元素數值模型在此溫鍛製程下的真實性，而後將相同的物模擬擬實驗架構與有限元素數值模型應用於目標材料鈦合金 Ti-6Al-4V 上，再比對物理模擬實驗與有限元素數值模型之結果，確認此鈦合金溫鍛製程之有限元素數值模型與事實相戶符合，便能藉由此模型進行不同製程參數的調控與試驗，進而得知最適合鈦合金 Ti-6Al-4V 溫鍛生產的製程參數。

**關鍵詞：**有限元素數值模擬、物理模擬、鈦合金Ti-6Al-4V、溫鍛

### Abstract

To evaluate the effects of process parameters in Ti-6Al-4V warm forging process, this paper proposed a new process development model. The model consists of physical and numerical simulation of stainless steel SUS304 and titanium alloy Ti-6Al-4V. With mutual verification of these two simulations, the simulation results can be verified and the applicability of the numerical simulation can also be assured.

First step of the new analysis model is establishing the physical simulation experiment of SUS304. With this step, the warm forging process can be set up and the effects of process parameters can be clarified. Then the numerical simulation model of SUS304 can be established precisely because the details of the warm forging process are verified in the physical simulation experiment. By comparing the results of physical and numerical simulation, the result of the numerical simulation of warm forging process can be confirmed. Therefore, the numerical simulation of SUS304 can be changed into the numerical simulation of Ti-6Al-4V. Not only the numerical simulations were performed but also the physical simulation experiment of Ti-6Al-4V. Then by comparing the results of physical and numerical simulation of Ti-6Al-4V, the accuracy of numerical simulation of Ti-6Al-4V can be

confirmed. With the verified numerical simulation model of Ti-6Al-4V, the effects of different process parameters can be predicted and the process parameters of Ti-6Al-4V warm forging process can be obtained finally.

**Keywords:** Finite element numerical simulation, Physical simulation, Titanium alloy, Warm forging, Process development

## 1. 前言

鈦合金溫鍛的製程分析在過去已有許多相關的研究存在，近期發展以有限元素之數值分析方式為大宗，然而此種分析方式未考量到真實溫鍛過程中的許多因素與狀況，同時並未對有限元素數值分析法的分析結果進行確認與驗證，因此其分析的結果往往和真實的溫鍛結果有所誤差而不被信任。因此，本研究將過去常用的有限元素數值分析法與視定塑性力學法發展而出的物理模擬進行混和，取此二分析方式之精華以相輔相乘獲得較準確的溫鍛製程預測與評估。

## 2. 文獻回顧

在鈦合金溫鍛製程中，鈦合金的可成形性深受鍛造製程參數的影響，包含鍛造溫度、變形速度與模具溫度等等，因此許豐裕[1]便利用有限元素法模擬 Ti-6Al-4V 的非恆溫鍛造製程以探討各製程參數的特性，隔年施博文[2]與鄭訓祺[3]亦對 Ti-6Al-4V 的熱模鍛造與恆溫鍛造進行有限元素模擬與分析，並預測實際鍛造結果，然而這些模擬分析往往缺乏實際情況的驗證，因此只能對製程參數的變化進行方向性的了解，難以直接應用在實際大量生產上。

在物理模擬的部分，溫志中[4]利用視定塑性力學對穩流製程與非穩流製程做出詳細的分析，並發展出電腦軟體以模擬不同實例驗證物理模擬的可行性，而後潘敏俊[5]以有限元素法配合視定塑性力學來模擬分析鍛粗材料的流動性質，體現了物理模擬的精髓；隨著物理模擬的蓬勃發展，Vazquez[6]、Yuli[7]與簡大偉[8]等人利用物理模擬的研究方式直接了解材料的流動性質與應變應力分布，進而進行模具設計、引擎葉片的開發及各式材料的可行性評估，因此可以得知物理模擬的分析方式受到廣泛的運用，並存在著相當深厚的理論基礎。

## 3. 混合物理與數值模擬

本研究為了瞭解鈦合金溫鍛製程最適當的製程參數，先利用業界常見的溫鍛材料—不銹鋼進行溫鍛製程的物理模擬，再將此物理模擬結果與有限元素數值分析之結果進行比對驗證，以確認有限元素數值分析法對此溫鍛製程之可行性與真實性，如此一來，便能夠熟悉物理模擬之實驗架構、了解各製程參數之影響，並確保此有限元素之數值模擬模型可靠；而後再將不銹鋼的模擬模型替換材料為目標材料鈦合金之模擬模型，以進行鈦合金溫鍛製程的物理模擬與有限元素數值模擬，並將兩者結果相互驗證比對，便能夠確保有限元素數值模擬模型之輸入參數正確，進而對鈦合金溫鍛製程進行準確的模擬預測與製程評估。

本研究先使用模型材料不銹鋼進行溫鍛製程模擬，其原因在於不銹鋼為業界最常見的溫鍛材料，以常見又具有研究基礎的材料進行物理模擬實驗，能夠避免實驗失敗，而快速地建立溫鍛製程架構，最後藉由此不銹鋼的物理模擬實驗結果與數值模擬結果的比對，能夠確保此溫鍛製程之有限元素數值模型具有其真實性。

此混合物理模擬與有限元素數值模擬能夠補足單獨物理模擬或單獨數值模擬之不足，使得此二模擬相互補足，進而完整且精準地預測鈦合金之溫鍛製程發展。

## 4. 混合模擬流程

### (1) 成品外型決定：

本研究所使用的成品設定為頭部幾何外型較為複雜的螺絲，如圖1示意圖所示，主要關注重點在於頭型的生成，即鍛粗的部分

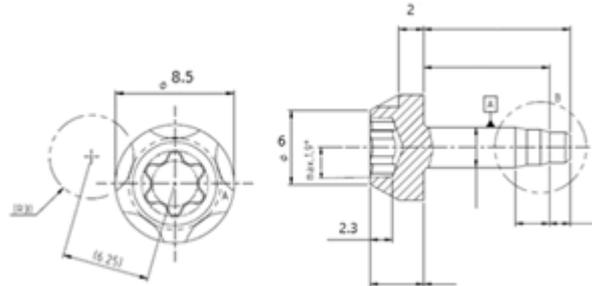


圖 1 成品示意圖

### (2) 模具、過程品與設備設計規劃：

本研究使用合作廠商三星科技所開發的模具來因應製造，主要的沖模組是編號T25梅花插針的沖棒與成品頭型相對應的沖模，母模設計則是單純中空直徑5.02mm的模具，如此的模具設計原理是為了能夠順利地打出頭型，並且在頭型的輪緣部分利用自由流體的方式進行胚料的流動(如圖2所示)，進而減少成型的模具壓力，並確實達到足夠車削的頭部外徑。

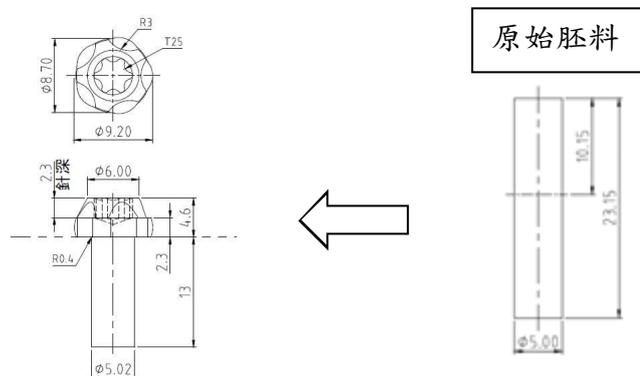


圖 2 過程品圖

### (3) 模型材料決定：

本研究所使用的模型材料為不銹鋼SUS304。由於配合廠商有此材料之溫鍛生產經驗，且不銹鋼SUS304是學術上常見的鍛造材料，因此材料資料庫的建立相當豐富而完整，故使用此材料作為模型材料能夠降低研究的難度並且確保材料參數設定的正確性。

### (4) 物理模擬實驗：

首先準備合適大小的原始胚料，再以感應加熱機進行胚料加熱，並以遠紅外線量測儀量測到所需的溫度時，便停止加熱，再轉移至鍛造機台上，進行鍛造，鍛造完成後紀錄成品之幾何外型特徵(包含充模情況、頭部高度與輪緣最外圍尺寸等)與相對應的母模負荷，以作為有限元素數值模擬的比對結果。

(5) 有限元素數值模擬分析：

本研究所使用的有限元素數值模擬方式是使用鍛造製程常用到的模擬解析軟體-Deform 3D。在進行鍛造模擬之前，先使用Deform 3D中的感應加熱模組對胚料進行感應加熱的模擬，而後再以此加熱結果進行鍛造模擬的前處理設定，分別包含塑流應力資料、熱學性質、定剪摩擦係數、模具設定、沖模速度設定與模擬條件設定，而後便能夠從後處理模組了解各條件下的成型過程，並紀錄需與物理模擬實驗比對的各項結果。

(6) 相互驗證：

經過物理模擬實驗與有限元素數值模擬後，此二者的結果便能夠進行驗證，相互驗證的項目主要有胚料經過鍛壓後的幾何外型（頭部高度、輪緣高度與輪緣最外圍尺寸等）、胚料在鍛壓過程中的充模情況以及金相分析，經過驗證比對便能夠知兩者結果是否存在差異，若存在差異則須修正有限元素數值模型以符合真實實驗的狀況；反之若情況相互符合則可以得知此有限元素數值模型與實際情況相互符合，能夠作為製程參數優化的根據，以決定整個合適的製程參數進而進行試鍛與正式生產。

4. 結果與討論

(1) 模擬材料不銹鋼之溫鍛結果與討論：

由比較SUS-304的物理模擬實驗與有限元素數值模擬結果可知，不論在常溫組或是加熱組兩者都有相近的結果，又SUS-304在同應變率與同應變值的情況下，常溫的應力值相較於高溫（600°C）的應力值最多會多出一倍，因此比對模擬之母模負荷值可以發現常溫組之母模負荷值亦高出加熱組之母模負荷值許多，因此可以得知此有限元素數值模擬模型的建立與物理模擬實驗的實際鍛造情況相互符合，此數值模擬模型有其可靠性，因此有利於進行鈦合金溫鍛的物理模擬實驗、有限元素數值模型的建立。

表 1 不銹鋼加熱組實驗與模擬值

|          |                     |       |       |       |       |       |       |
|----------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 材質       | 304                 |       |       |       |       | 實驗值   | 模擬值   |
| 轉速(hz)   | 45                  |       |       |       |       |       |       |
| 溫降時間(s)  | 8                   | 4.93  | 4.81  | 4.67  | 6     |       |       |
| 加熱溫度°C   | 636                 |       |       |       |       |       | 634   |
| 母模負荷(N)  | 34545               | 32781 | 32438 | 33075 | 32046 | 32977 | 35182 |
| 頭度高度(mm) | 4.85                | 4.88  | 4.84  | 4.72  | 4.7   | 4.798 | 4.72  |
| 輪緣厚度(mm) | 9.18                | 9.28  | 9.17  | 9.2   | 9.2   | 9.206 | 9.11  |
| 結果       | 幾何外型上有些微的差距不過變形趨勢相同 |       |       |       |       |       |       |

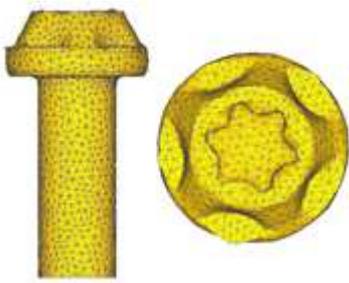


圖 4 不銹鋼加熱組模擬幾何外型

表 3 不銹鋼常溫組實驗與模擬值

|          |   |         |       |          |         |       |     |
|----------|---|---------|-------|----------|---------|-------|-----|
| 材質       | 304   |         |       |          |         | 實驗平均值 | 模擬值 |
| 轉速(hz)   | 10  |         |       |          |         |       |     |
| 溫降時間(s)  | 無加熱   |         |       |          |         |       |     |
| 加熱溫度°C   |   |         |       |          |         |       |     |
| 母模負荷(N)  | 50323   | 50009.4 | 64680 | 55004.14 | 50891.4 |       |     |
| 頭度高度(mm) | 4.9   | 4.8     | 5.06  | 4.920    | 4.87    |       |     |
| 輪緣厚度(mm) | 8.66  | 9.07    | 8.5   | 8.743    | 8.78    |       |     |
| 偏心       | 是   | 是       | 否     |          |         |       | 是   |
| 結果       | <ul style="list-style-type: none"> <li>不論是幾何外型還是母模負荷都有相當趨近的結果</li> <li>尤其在偏心的反應上相同，在成形的過程中有扭曲的現象，導致偏心的結果</li> </ul> |         |       |          |         |       |     |

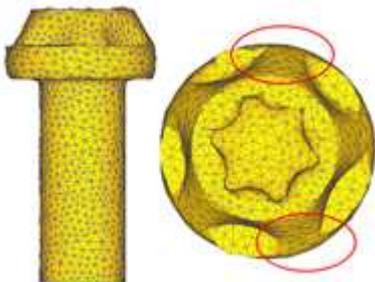


圖 5 不銹鋼常溫組模擬幾何外型

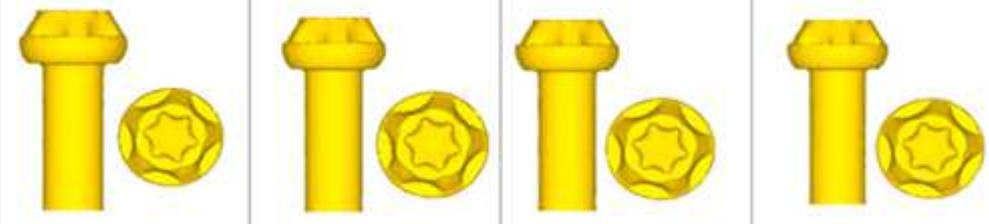
## (2) 目標材料鈦合金之溫鍛結果與討論：

在鈦合金的有限元素數值模擬中可以發現當鈦合金加熱至 910°C 後，其數值模擬結果與物理模擬實驗結果有很大的不同，實驗的鈦合金在鍛造的過程中會有材料過軟的現象，但模擬的結果沒有這樣的情況發生，因此推斷有限元素數值模擬所使用之材料與物理模擬實驗所使用的材料有所出入。

由物理模擬實驗材料之材料證明可以得知，此材料的 Al 成份相較於一般鈦合金的 Al 成份還來得少，因此可推論本研究所使用的實驗鈦合金材料其  $\beta$  轉換溫度較低，因此當加溫至 910°C 後材料已轉變為不同於材料資料庫所設定的鈦合金。又由金相觀察可以得知，此物理模擬實驗之鈦合金加熱至 910°C 並空冷後的金相組織會出現  $\beta$  相中附有針狀的  $\alpha$  相並與初析之  $\alpha$  相共存，因此可知當此物理模擬實驗之鈦合金加熱至 910°C 便已超過此材料之  $\beta$  轉換溫度。

然而另外建立實驗材料之塑流應力之資料會曠日廢時且耗費成本高，因此本研究下調製程之加熱溫度，確保材料在加熱與鍛造過程中都不會超過其  $\beta$  轉換溫度，便能適用有限元素數值模型中的塑流應力資料。而下調鍛溫後的有限元素模擬結果與物理模擬實驗結果相互吻合（如表 4 所示），不論在幾何外型的輪緣厚度、頭部高度或是母模負荷上都有相近的結果，因此可以得知此鈦合金之有限元素數值模型在不超過  $\beta$  轉換溫度的情況下能夠作為鈦合金溫鍛製程規劃的依據。

表 4 鈦合金溫鍛有限元素數值模擬結果

| 結果比較       |  |         |         |         |         |       |         |         |
|------------|--|---------|---------|---------|---------|-------|---------|---------|
|            | 實驗平均   | 模擬結果    | 實驗平均    | 模擬結果    | 實驗平均    | 模擬結果  | 實驗平均    | 模擬結果    |
| 轉速 (頻率 Hz) | 45   |         |         |         |         |       |         |         |
| 加熱時間 (S)   | 30   |         | 25      |         | 20      |       | 15      |         |
| 加熱溫度 (°C)  | 845  | 845     | 809.75  | 810     | 736     | 736   | 646     | 646     |
| 成型溫度 (°C)  | 729.125  | 730     | 723.6   | 723     | 660.5   | 660   | 566.5   | 566     |
| 母模負荷 (N)   | 23691.5  | 23392.6 | 24666.6 | 24196.2 | 27268.5 | 27391 | 31531.5 | 32496.8 |
| 輪緣厚 (mm)   | 2.21875  | 2.23    | 2.244   | 2.24    | 2.265   | 2.27  | 2.345   | 2.36    |
| 頭高 (mm)    | 4.52125  | 4.51    | 4.552   | 4.55    | 4.6     | 4.62  | 4.615   | 4.62    |
| 成型結果       |  |         |         |         |         |       |         |         |
|            | 下調成形溫度後可以發現模擬結果與實驗結果相近, 同樣會出現頭部流料不均勻的問題  |         |         |         |         |       |         |         |

## (3) 目標材料鈦合金之溫鍛製程改善

不論在何種鍛溫下此溫鍛製程之成品頭部會有流料不均的問題，因此需要進行溫鍛製程之改善，本研究以母模設計變更、鍛造溫度、潤滑與鍛胚長度的調整，來進行溫鍛製程的改善。而後發現當胚料長度設定為 23.7mm 與母模挖槽開口角度設定 5 度時，胚料頭型飽滿，且沒有偏心的問題，梅花沖針所留下的印記也是對稱而沒有缺料的問題，同時幾何尺寸上均有符合圖面要求，又鍛造溫度 660 度的母模負荷低了鍛造溫度 566 度的母模負荷約 4000N，因此本製程最佳的製程參數為鍛造溫度 660 度，鍛胚長度 23.7mm 與母模開口角度 5 度會有最接近理想的成形結果，若能夠再配合使用潤滑劑使得摩擦係數降低，便能使鍛造成果趨近圖面需求。

## 5. 結論

- 混合物理與數值模擬之研究方式能夠有效地預測與評估鈦合金之溫鍛製程，同時能夠達到溫鍛製程經驗之累積、實驗費用之節省、數值模型之可信與整體製程之改善，因此本研究方式能夠針對難以鍛造又沒有鍛造經驗的特殊材料進行金屬成形與鍛造製程的分析與規劃。
- 鍛造前製程感應加熱確實在經過實驗驗證後可以利用有限元素軟體 Deform 進行加熱情形的重現，並能夠針對不同加熱情況進行模擬與預測，不過需要配合相對應的材料特性係數與機台加熱特性等，方能夠完成重現與預測。
- 鈦合金之相變態溫度點會隨著成分如  $\alpha$ 、 $\beta$  安定成分而有所變化，且其變化之溫度差異相當大，需要進行加熱實驗後方有辦法判斷其相變態溫度點。
- 鈦合金溫鍛製程在模具沒有進行加熱的情況下，其胚料鍛造溫度並非越高越好，而是需要配合相變態溫度點與模具設計等情況進行分析與討論，方能夠獲得最適合的工作溫度設定。
- 以本研究所使用的鈦合金與溫鍛模具設計而言，最適合溫鍛製程的鍛造溫度 660 度，鍛胚長度 23.7mm 與母模開口角度 5 度會有最接近理想的成形結果，若能夠再配合使用潤滑劑使得摩擦係數降低，便能使鍛造成果趨近圖面需求。

## 6. 致謝

本文作者感謝三星科技股份有限公司提供產學計畫經費及相關技術支援。

## 7. 參考文獻

- [1] 許豐裕, "鈦合金非恆溫鍛造之製程分析", 國立成功大學機械學系碩士論文, 1993
- [2] 施博文, "鈦合金熱模鍛造之製程參數特性研究", 國立成功大學機械學系碩士論文, 1993
- [3] 鄭訓祺, "鈦合金恆溫鍛造製程參數特性分析", 國立成功大學機械學系碩士論文, 1995
- [4] 溫志中, "鍛造製造之物理模擬", 國立成功大學機械學系碩士論文, 1986
- [5] 潘敏俊, "階梯形鍛件之塑性力學分析與粗鍛胚設計之評估", 國立成功大學機械學系碩士論文, 1990
- [6] Vazquez, V. and Altan, T. "New concepts in die design — physical and computer modeling applications", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 98, Issue 2, Pages 212-223, 29 January 2000
- [7] Liu, Y., Du, K., Zhan, M., Yang, H. and Zhang, F., "Physical modeling of blade forging", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 99, Issues 1-3, Pages 141-144, 1 March 2000
- [8] 簡大偉, "應用物理模擬機於錳硼鋼之高溫可成形性研究", 國立成功大學機械學系碩士論文, 2014