飛機發動機用鈦合金葉盤之恆溫鍛造製程研究
A Study of the Isothermal Forging Process on the Blisk of Titanium Alloy in the Aircraft Engine

楊俊彬[1]、李乘清[2]、林明煌[3]、李俊霖[4]、陳涵鏞[5]、楊政諱[6]、劉志雄[7]、陳柏均[8]、趙柏勛[9]
J.B.Yang[1],C.C.Lee[2], M.H.Lin[3], J.L.Li[4], H.Y.Chen[5], J.H.Yang[6], C.H.Liu[7], B.J.Chen[8], P.H.Chao[9]
教授[1]、副所長[2]、組長[3]、工程師[4~9]
Professor[1], Deputy Director[2], Chief[3], Engineer[4-9]

國立高雄科技大學模具與鍛壓製程技術中心[1,6,7,8,9]
國家中山科學研究院航空研究所[2-5]
Precision Forging and Forming Process Technology Development Center,
National Kaohsiung University of Science and Technology
National Chung-Shan Institute of Science and Technology, Aeronautical System Research Division
E-mail：binbin@nkust.edu.tw

摘要

飛機發動機運轉時承受高溫與高應力，其葉片須使用耐熱且高溫強度材料，諸如 Ti-64，Ti-6246，IN-718 及 UDIMET720Li，但這些材料難於以傳統鍛造方式成形，主要為模具之激冷效應所致，無法鍛製具有薄腹板、高肋骨和薄壁的近淨形精密鍛件。粗製鍛件使材料使用率低，機加工量大，導致成本變高，甚至將材料內部之鍛流線切斷，使耐疲勞性變差。故需使用所謂之恆溫鍛造製程，才能鍛製近淨形精密鍛件。

本研究以縮尺型發動機用Ti-6246葉盤(blisk)為載具，開發其恆溫鍛造製程與模具，期建立恆溫鍛造製程參數。首先進行鍛胚與鍛造製程設計，以DEFORM鍛造模擬軟體分析並確認可行。同時，將傳統油壓鍛機進行改造，使鍛壓速度降為0.28mm/sec，並以Mar247鎳基超合金製作恆溫鍛造用模具與建置低週波感應式模具加熱系統，進行Ti-6246葉盤在945℃之恆溫鍛造。最後鍛件做金相組織與尺寸檢驗。

結果顯示，本研究中，Ti-6246在945℃之恆溫鍛造時可得最佳之鍛後組織，其為均勻之等軸α相+針狀β相，另尺寸與鍛流線符合鍛胚圖面要求。依實際恆溫鍛造實驗可知，在945℃時之鍛造面壓約為25~30kg/mm^2。本研究之製程參數經驗證為可行，可成功地鍛製縮尺型之葉盤鍛件，此為國內首次以恆溫鍛造製程開發葉盤類鍛件之成功案例。

關鍵詞：近淨形、恆溫鍛造、葉盤

Abstract

The blades in the jet engine are endured high temperature and high stress during operation. The materials of the blades should use the materials of heat resistant and high strength, such as Ti-64，Ti-6246，IN-718and Udimet720Li., which are hard to be forged. However, the forgings of the above materials cannot be made the near net shape forging parts with thin web, high rib and thin wall due to the chilling effect of the tooling in the conventional forging process. The low materials yielding, much machining, even the flow line cut, will be occurred, the high cost and poor fatigue resistance of the parts will be resulted in. The so-called isothermal forging process needs to be used for making the near net shape forging parts.

In this study, the reduced scale blisk of Ti-6246 was used as the vehicle to develop the isothermal forging process, and expected to establish the process variables and tooling. At first, the forging part was designed and the forging process were confirmed by using DEFORM simulation. Simultaneously, the hydraulic press was reconstructed by lowering down the forging speed to 0.28mm/sec, and the tooling heating device of low frequency induction and the tooling, which materials was Mar247, were developed. Then, Ti6246 was used as the raw materials to conduct the isothermal forging at 945℃. Finally, the inspections for the metallography and dimensions were conducted.

The results showed the optimum structure of equiaxed α phase and acicular β phase could be obtained for forging at 945℃. Besides, the flow line and the dimension of the parts were conformed to the requirements. In actual forging at 945℃, the forging pressure could be obtained as 25~30kg/mm^2. The process variables in this study were verified to be feasible and the reduced scale blisk was developed successfully. It is the first time to develop the blisk by the isothermal forging process in our country.

Keywords:near net shape, isothermal forging, blisk

1. 前言

現代渦輪噴氣發動機主要之零部件包括葉片，轉子，轉軸，殼件等等，其結構分別由進氣段，壓縮段，燃燒段與排氣段組成（如圖 1)，各個區域都須要有葉片或葉盤做運轉，分別為風扇葉片，低壓壓縮葉片，高壓渦輪葉片與低壓渦輪葉片，。由於發動機運轉時承受高溫與高應力，而各區段的使用環境其溫度與負載有所不同，因此葉片或葉盤之設計與所使用的材料亦不相同。發動機前段進氣與壓縮部為冷區，其葉片為風扇葉片與低壓壓縮葉片，材料分別使用 Ti-6Al-4V 或 Ti-6Sn-24Zr-6Mo，後段燃燒與排氣為熱區，其葉片為低壓渦輪葉片與高壓渦輪葉片，材料分別使用 INCONEL 718 或 UDIMET 720 等耐熱鎳基超合金。

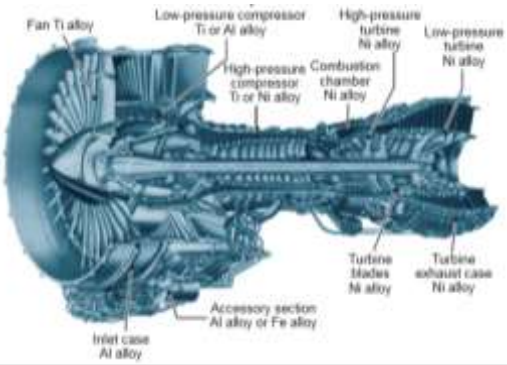


圖 1. 發動機各區段結構材料選用

一般而言，為顧及發動機內部零件之使用壽命與安全性，其製程主要為鍛造製程，而非全機械加工製程。然而, 這些合金所具有的高耐熱性, 使得該類合金的開胚、鍛造愈加困難, 即高溫合金熱加工難度非常高。所以，鈦合金材料與鎳基超合金材料皆屬於難成形金屬材料，傳統上都以熱間鍛造製程成形，因其鍛造溫度高且範圍比較小，塑性成形性較差、高溫變形抵抗能力很高，很難製作精密鍛件。尤其是在鍛造具有薄的腹板、高肋骨和薄壁的零件時，胚料的溫度很快地被模具吸收，即所謂的激冷效應(chilling effect)，變形抵抗迅速提升，塑性急劇降低，不僅需要大幅度提高設備能力，也易造成鍛件破裂。因此，不得不增加鍛件厚度，增加機加工餘量，降低了材料利用率，造成製造成本的提升。另一方面，大量之機械加工將材料內部鍛流線(flow line)切斷，導致零件之強度與耐疲勞性劣化。

因此，自 70 年代以來，為改善上述之問題點，恆溫鍛造製程技術就被研究開發，並迅速地被發展起來，達到近淨形鍛造之目標。恆溫鍛造有別於傳統鍛造主要有兩個重點，一是模具溫度(TD)約與工件溫度(TP)近似或相同，即 TD/TP=0.90~1.05，減少激冷效應。二是加壓之應變速率低，一般低於 0.5mm/mm/min 或加壓速度為 0.02~1mm/sec。降低材料之流動應力與鍛造負荷，提升模具壽命。則可鍛製近淨形精密鍛件。如圖 2 所示，顯示素材與傳統鍛件加工後，材料內部鍛流線被切斷，此將導致耐疲勞性變差，然而恆溫鍛造之精密鍛件則機加工後鍛流線完整，耐疲勞性較好。

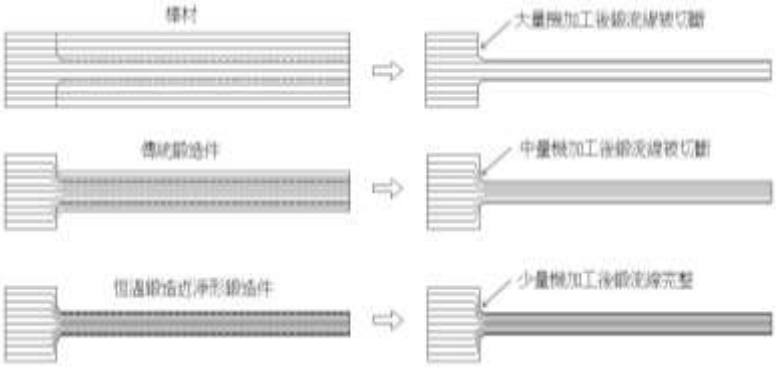


圖 2. 素材與傳統鍛件加工後，材料內部鍛流線被切斷。恆溫鍛造之精密鍛件則機加工後鍛流線完整

2. 研究目的

本研究以縮尺型發動機用 Ti-6246 葉盤(blisk)為載具，開發之其恆溫鍛造製程與模具，期建立恆溫鍛造製程參數。圖 3 為縮尺型葉盤之機械加工圖與 3D 圖。

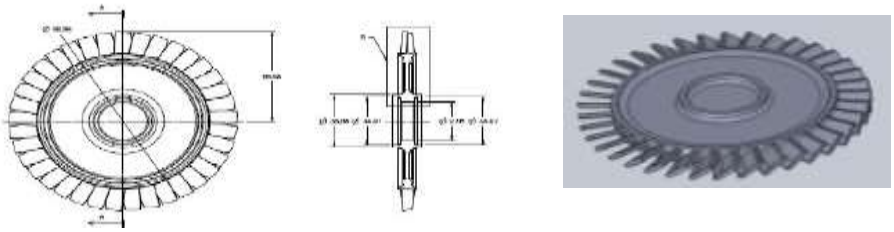


圖 3. 縮尺型 Ti-6246 葉盤之機械加工圖與 3D 圖

3. 結果與討論

3.1 鍛胚設計與恆溫鍛造製程規劃

依照機加工圖設計鍛胚，為預成形胚與完成鍛胚，其恆溫鍛造流程如圖 4 所示。

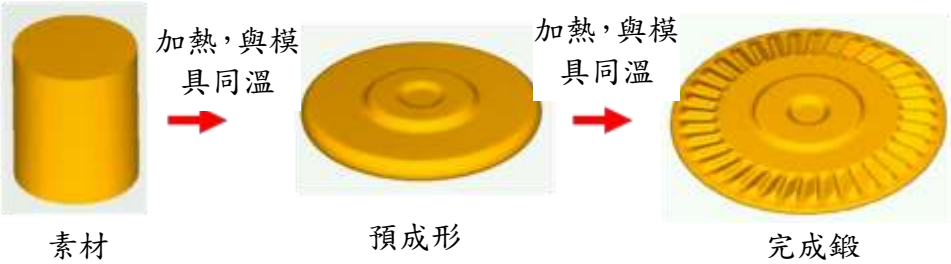


圖 4. 預成形與完成鍛鍛胚設計圖與恆溫鍛造製程規劃

恆溫鍛造製程參數設定如下。

- 胚料鍛造溫度：因為根據材料供應商之資料，Ti-6246 之 β 相轉換溫度為 980℃，在此溫度下鍛造即所謂之 $\alpha+\beta$ 鍛造，所得到之金相為等軸 α 相+針狀 β 相 。鍛造溫度設定為 945℃。胚料為避免氧化，在表面先被覆玻璃系潤滑劑，再進行加熱。
- 模具材料與加熱溫度：本研究之模具材料使用 Mar247 鎳基耐熱超合金材料，模具以低週波加熱至胚料鍛造溫度，避勉 Chilling Effect，以進行所謂之恆溫鍛造製程。
- 鍛造速度：因實驗用油壓式鍛機其成形速度無法調為應變速率模式，故以等速模式進行，設定為 0.28mm/sec。

3.2 DEFORM 鍛造成形模擬分析

依製程參數設計，以 DEFORM 軟體進行鍛造製程分析，探討鍛胚流線與鍛造負荷。如圖 5 所示，鍛造流線沿著葉片軸向分佈，符合預期要求。而若為全機加工的葉片其流線則是與葉片軸向垂直。顯示鍛造葉片具有較佳之疲勞強度性質。此外，結果亦無缺料與包料現象。顯示本研究之鍛胚設計為可行。根據結果顯示，當在 945℃進行恆溫鍛造模擬時，鍛造負荷在預成形時約 100ton，完成鍛時為 432ton。此外圖 6 顯示鍛件之溫度變化情形，預成形與完成鍛胚內部的溫升為 4~5℃，毛邊處因為變形較大，溫升為 8℃，但毛邊在後續是要切除，不會影響鍛件機械性質。因此，在 945℃做恆溫鍛造，基本上溫升不大，並不會致使金相組織變化為 β 相。顯示 0.28mm/sec 等速鍛壓速度為可行。

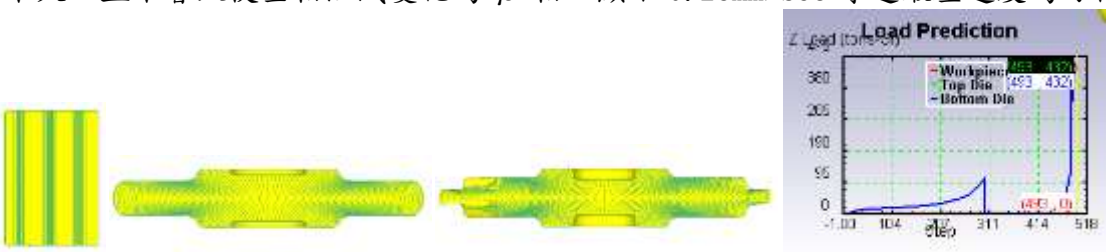


圖 5. 945℃鍛造時鍛胚流線與鍛造負荷模擬

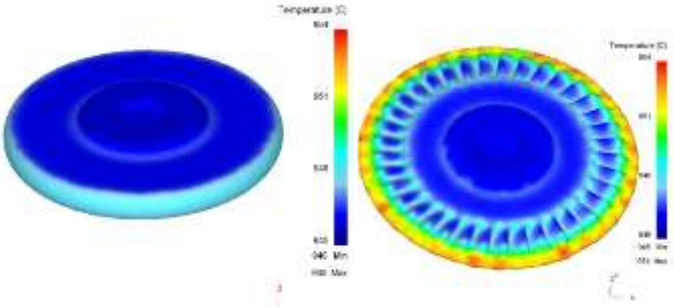


圖 6. 945℃恆溫鍛造，0.28mm/sec 等速鍛壓速度下，鍛胚溫度變化模擬

3.3 恆溫鍛造作業

將胚料鍛造溫度與模具加熱溫度設定為 945℃，以 0.28mm/sec 等速鍛壓速度進行恆溫鍛造製程作業，探討鍛後胚料之金相組織。圖 7 為恆溫鍛造模具外觀與作業情形。當在 945℃鍛造時之負荷為 450ton~550ton，此時之鍛造面壓為 25~30kg/mm^2。

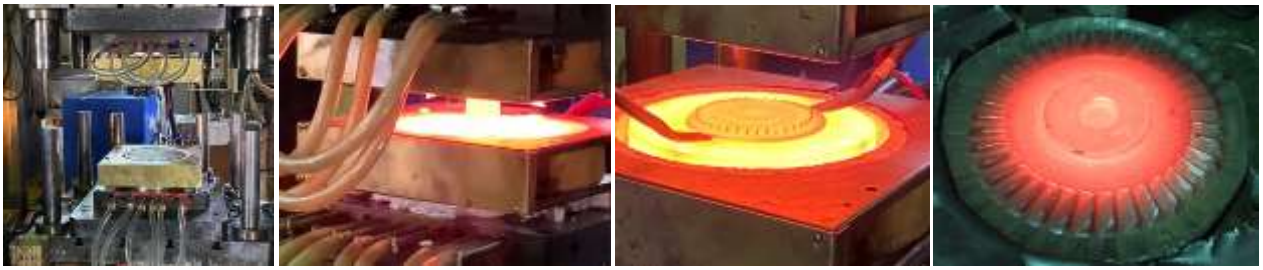


圖 7. 實際恆溫鍛造模具外觀與作業情形，顯示為鍛造開始，鍛造完成與鍛胚取出外觀

3.4 金相組織檢驗

針對完成鍛之葉盤鍛件進行中心與葉片部取樣，觀察金相組織。如圖 8 所示，顯示在 945℃進行恆溫鍛造時，心部與葉片部均為等軸 α 相+針狀 β 相，此結果符合預期目標。

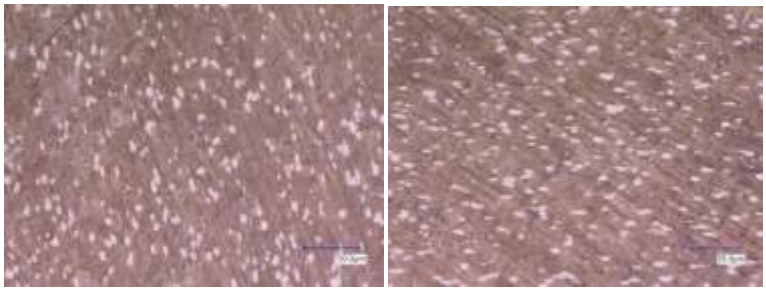
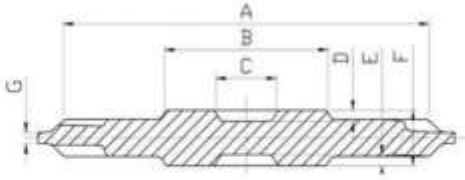


圖 8. 葉盤在 945℃鍛造之金相組織(左為中心部，右為葉片部)。

3.5 鍛件檢驗

圖 9 為小批量試鍛之胚料外觀。取樣進行流線檢驗與尺寸檢驗。流線平順與成形模擬之結果相符合。在葉片處的流線是平行於葉片軸向，可得到較好之耐疲勞強度。圖 10 為尺寸檢驗結果，亦符合預期目標。

圖 9. 小批量試鍛之胚料外觀，上為預成形，下為完成鍛。右圖為流線檢驗。



量測位置	A	B	C	D	E	F	G
規格	ϕ136±2	ϕ60.8±1	ϕ22.4±1	4±1	4±1	ϕ19.9±1	4±1
量測值	ϕ137	ϕ61.2	ϕ22.7	3.4	3.2	19.97	4.2

圖 10. 尺寸檢驗結果

4. 結論

1. 本研究結果顯示，Ti-6246 材料之恆溫鍛造製程，胚料加熱溫度至 945℃，模具成形部溫度亦加熱至此一溫度範圍，可得最佳之鍛後組織，其為等軸 α 相+針狀 β 相。
2. 由模擬結果得知，恆溫鍛造之鍛壓速度設定為 0.28mm/sec 時，鍛胚本體之溫度變化為 4~5℃，變形所致之升溫不大。在實際鍛造製程上，在此鍛壓速度時，鍛件之金相顯示組織是穩定且均勻。因此等速度模式適合做為恆溫鍛造製程之鍛壓速度。本研究所設定之 0.28mm/sec 之鍛壓速度亦適合做為恆溫鍛造製程之參數。
3. 由實際恆溫鍛造實驗可知，Ti-6246 在 945℃之恆溫鍛造時之鍛造面壓約為 25~30kg/mm^2。
4. 本研究恆溫鍛造實驗鍛胚尺寸量測結果，顯示尺寸符合葉盤鍛胚圖面設計值。
5. 經由本研究之葉片恆溫鍛造實驗得知 MAR247 模具在 945 ℃時仍具有足夠之高溫強度，適合做為 Ti-6246 之恆溫鍛造模具材料。
6. 本研究建立 Ti-6246 之恆溫鍛造製程參數，並開發低週波感應式模具加熱系統與鍛造模具，可成功地鍛製縮尺型之葉盤鍛件，其鍛流線平順，金相組織與尺寸符合要求。顯示本研究之研發成果為可行，亦為國內首次以恆溫鍛造製程開發發動機用葉盤鍛件之成功案例。

5. 誌謝

感謝國家中山科學研究院航空研究所提供本研究經費與投入人力、技術協助本研究執行。