

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 加壓程序對超塑性鋁合金變形特性之影響研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2212-E-216-005-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：中華大學機械與航太工程研究所

計畫主持人：吳泓瑜

計畫參與人員：楊渝翔、邱垂泓

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 26 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

## 加壓程序對超塑性 5083 鋁合金成形特性之影響研究

Effect of Pressurization cycle on the deformation characteristics of a  
superplastic 5083 Al alloy

計畫編號：NSC 93-2212-E-216-005

執行期間：93年 8月 1日至94年 7月31日

計畫主持人：吳泓瑜 中華大學機械與航太工程研究所教授

E-mail: ncuwu@chu.edu.tw

計畫參與人員：楊渝翔、邱垂泓 中華大學機械與航太工程研究所研究生

### 一、中文摘要

本論文主要探討超塑性 5083 鋁合金在不同加壓程序下之超塑性變形特性。利用具有背壓之反向加壓程序進行超塑性成形實驗，來探討超塑性鋁合金 5083 在反加壓程序對試片之變形狀態、厚度分佈、應變速率、金屬流之變化及空孔狀態的影響。就本研究所吹製的杯狀試件而言，僅需 78 秒左右就可完成試件的製作。杯狀柱形試件的成形過程，板片未與模具接觸前，其變形呈現半球狀且近似於自由成形狀態。在此階段中，反加壓程序與傳統等應變速率成形的特性相當類似，成形試件的厚度、應變速率及空孔分佈都是呈現階梯狀態，除厚度分佈是由試件的中央區域向邊緣區域遞增外，其餘則是呈遞減。在板片與模具底部接觸後至完全成形階段，板片由於受到與模具表面接觸所產生的摩擦力作用，加壓程序對本階段的變形狀態造成很大的影響。在此階段，就等應變速率加壓程序而言，厚度最薄的位置是在柱狀杯形零件之彎角處，而在反向加壓程序下，厚度最薄的位置則是在距離中央位置 7.5 mm 處。

關鍵詞：超塑性 5083 鋁合金，反加壓程序，空孔

### Abstract

The purpose of this work was to study the deformation characteristics of a 5083 Al alloy using different pressurization cycles. An inverted pressurization cycle with back pressure was introduced to explore the influence of the forming procedure on the deformation state, thickness distribution, strain rate, cavitation and variation of the metal flow during superplastic forming. A right cylindrical cup could be superplastically gas pressure formed in about 78 sec in this work. The deformation behavior was similar to that of traditional constant strain forming during the free bulging stage. In this stage, a stress state gradient from the pole to the edge of the formed dome was observed. After the center point of the deformed sheet touched the die surface, the metal flow pattern was found to be different from that of the traditional approach. The position with the minimum thickness did not fall at around the bottom corner of the cylindrical cup, it was located about 7.5 mm away from the bottom center of the cup.

Keywords: Superplastic 5083 Al alloy, Inverted pressurization cycle, Cavitation

## 二、前言

超塑性鋁合金可以有相當大的變形量，但是在超塑性變形的過程中，會有空孔(Cavity)的產生，因此限制了超塑性成形製程的成形應變速率，降低生產速率。超塑性試件中的空孔量與變形量有相當大的關係，基本上，應變量愈大空孔量就愈多。在吹氣成形的超塑性成形過程中，成形速率會影響零件成品的厚度分佈狀況；也就是會造成不同的應變分佈情形。成形速率越快，厚度分佈會越不均勻，薄化(Thinning)現象會較嚴重，局部區域的空孔量會較多。使用較慢的成形速率是有可能會減少空孔量，但是卻會增加生產成本，使得超塑性成形的製造技術降低其實用性。一般而言，超塑性成形製程所使用的應變速率約在  $10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ ，單一零件的製作約需 20 至 30 分鐘左右。為了提升超塑性成形的應變速率，以推廣超塑性成形的一般商業性應用，對與空孔的狀態有必要進行更深入的了解，來降低成形零件中之空孔量及所需要的製程時間。為了降低成形試件中的空孔量，目前原則上採用較低的應變速率或是使用背壓的方式成形。但是這兩種方式對於製造成本的增加均有相當大的影響，而且在零件的製作上需要耗費相當的工時：這也是超塑性成形無法廣泛的應用在一般商業化生產的最主要因素。

## 三、研究目的

本計畫是以吹氣成型的方式，吹製不同成形階段的超塑性鋁合金試件，利用多軸應力的變形狀態及使用背壓的成形過程中，探討加壓程序對變形金屬流及空孔狀態的影響，由此來調整成形時的加壓程序，藉以增加超塑性鋁合金的成形速率，並提高超塑性成形技術的應用效益。

## 四、文獻探討

超塑性鋁合金在超塑性變形的過程中，材料內部會有微小孔洞(small cavity)的形成或是空孔狀態(cavitation)的產生[1-4]。這些空孔(cavity)很不均勻的散佈在材料內，由於基材本身具有相當好的超塑性，當在相當大的塑性變形量狀況下，空

孔可能會因成長及結合而變的非常大。超塑性成形是藉由模具中模穴的形狀來達到所需之零件外形，零件的形狀在成形過程中，會對變形板片不同位置產生應力(stress state)或應變(strain state)狀態差異的現象。零件形狀所造成的應力或是應變狀態，對空孔的成長會有很大的影響。在擴散控制成長(diffusion controlled growth)機構中[5]，最大主軸應力是影響空孔成長的主要因素，而幾何形狀則會影響變形過程中最大主軸應力的大小。而在應變控制成長(strain controlled growth)機構中[6]，影響空孔成長之主要因素則為平均應力的大小。影響空孔狀態的因素相當複雜，而且這些因素之間彼此都有其關聯性。

在超塑性成形的過程中，由於模具表面與變形板片之接觸，會影響金屬流的狀態。就吹製簡單形狀的試件而言，板片的變形應該分為兩個階段來探討；在變形的初期至板片接觸模底時為第一階段(Stage I)，由板片觸底後至完全成形為第二階段(Stage II)[7]。在變形試片未與模底表面接觸的階段，試片的變形除了因入模角的影響外，板片未與模具表面接觸，其變形類似自由成形的狀態。當變形板片與模底面接觸後，由於模具表面摩擦力的作用，板片的變形會受到牽制。在此階段中，不論是變形的力學分析或是空孔狀態的分析，與板片觸底前之自由成形過程都會有很大的差別。

在超塑性的變形過程中，局部地區所存在的拉伸應力是造成空孔狀態的主要因素。因此由空孔成長機構的理論分析顯示，如果利用背壓(Back pressure)來減少變形時的最大主軸應力(Maximum principal stress)或是平均應力(Mean stress)可以限制空孔的成長速率[8-11]。在鋁合金的超塑性成形過程中，使用背壓的成形可以減少空孔因應變增加而增加的速率；在具有同樣變形量的狀態下，可以減少空孔的程度。因此利用背壓的成形方式，是有可能調整成形時的加壓程序，進而達到增加成形應變速率的效果。本研究文是以吹氣成型的方式，吹製杯狀柱形的超塑性 5083 鋁合金

試件，利用不同成形階段之成形試件，以量化方式探討成形過程中，加壓程序對5083 超塑性鋁合金變形特性及空孔狀態的影響。

### 五、研究方法

本實驗所使用之板片材料是向日本 Sky 公司所購買的5083超塑性鋁合金，其化學成份如表1所示。板片之厚度為2 mm。在400°C再結晶處理後，所得之晶粒尺寸約8.2~8.6μm。

將已裁切好之超塑性鋁合金板片，先以蝕刻機在試片表面上以化學浸蝕的方法 (Chemical etching)，刻上直徑為 2.5 mm ( $d_0$ ) 之小圓形網格，並記錄其座標值。在超塑性成形的過程中，這些小圓形位置會移動，也會因變形而成為較大之圓形或是成為橢圓形。變形板片上蝕刻小圓的變化，與變形過程中所受到的應力狀態或是應變狀態有關；若是受到等軸應力的狀態，則會因板片變薄而成為較大的圓形，如果是受到平面應變的狀態，則會向拉力方向延伸而成為橢圓形。在獲得不同條件之超塑性成形試件後，分別量測變形後不同位置網格短軸及長軸之直徑  $d_1$ 、 $d_2$  及試件的厚度  $h$ ，再將這些數據利用下式計算不同位置的主軸應變 (Principal strain)、等效應變 (Effective strain) 及平均應變速率 (Average strain rate) 等；主軸應變的方向如圖 1 所示：

$$\varepsilon_1 = \ln(d_1/d_0) \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \ln(d_2/d_0) \quad (2)$$

$$\varepsilon_3 = \ln(h/h_0) \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon} = \left[ \frac{2}{3} (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \bar{\varepsilon}/t \quad (5)$$

式中

$\varepsilon_{1,2,3}$ ：1、2及3方向之主軸應變

$\bar{\varepsilon}$ ：等效應變

$\dot{\bar{\varepsilon}}$ ：平均應變速率

利用此項結果建立超塑性成形過程中，成形參數及應力或應變狀態對成形性的影響。將蝕刻完成之鋁合金板片置於模具內，依據所需之應變速率，隨時間調整壓

力進行吹氣成形。

表 1 超塑性 5083 鋁合金之化學成份

Element	Mn	Mg	Cr	Cu	Fe	Al
Wt%	0.67	4.60	0.10	0.02	0.05	Bal.

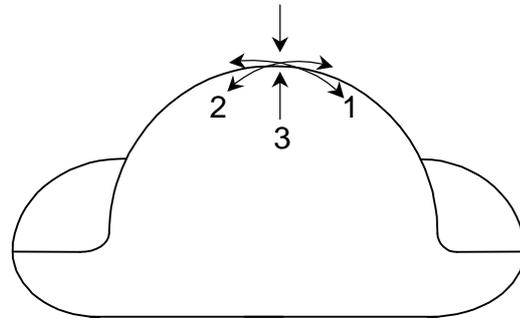
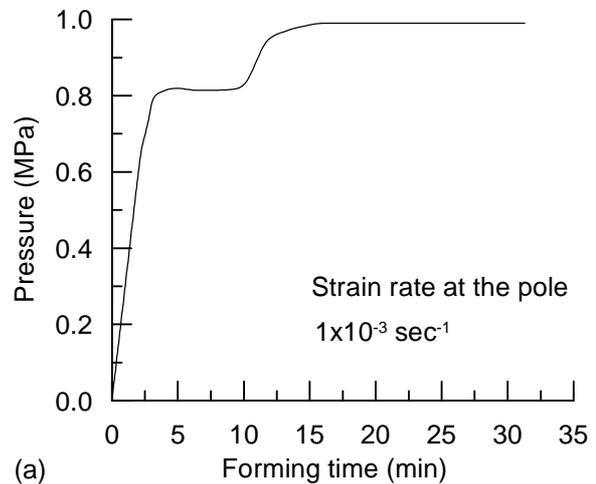
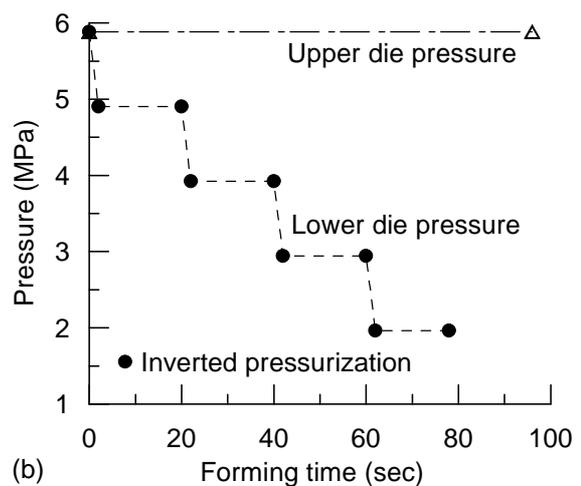


圖 1 半球狀試件主軸應變方向示意圖



(a)



(b)

圖 2 不同加壓程序壓力隨時間變化之關係圖。(a)等應變速率加壓程序圖 (b)反向加壓程序圖

本研究以吹氣成形(Gas blow forming)法，進行杯狀試件不同成形階段的超塑性變形；吹製試件所使用之模穴形狀為直徑 40 mm，深 20 mm 之圓柱狀杯形。本實驗所使用的加壓程序如圖 2 所示。所採用之反向加壓成形程序；如圖 2(b)所示，是具有背壓之加壓程序，其加壓方式與傳統所使用具有背壓之等應變速率成形並不相同。在傳統施加背壓之程序中，是在下模中施加一固定大小之壓力，而在上模內施加一大於下模內壓力之成形壓力，並逐漸增加上模之壓力讓板片變形，成形過程中，板片所受之背壓不變。反向加壓成形程序則採用減壓的方式進行，在成形前，上下模內均先加入同樣大小之壓力，然後在成形過程中，逐步減少下模中之壓力，利用上下模內之壓力差進行板片成形。採用傳統  $1 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$  等應變速率成形完成一個直徑 40 mm、高度為 20 mm 的杯狀柱形零件所需之時間約為 33 分鐘，而使用反向加壓程序製作僅需 1 分 18 秒左右。成形實驗過程中，模穴或板片添加潤滑劑。空孔之量化分析工作主要是利用光學顯微鏡及影像分析軟體 Optimas5 來進行[12]。

## 六、結果與討論

### 3.1 成形過程變形狀態分析

在吹製杯狀柱形試件的超塑性成形過程中，可以將板片變形過程區分成兩階段來探討，如圖 3 所示。第一個階段為板片開始成形但未與模具底部表面接觸前，在這個階段板片的變形除了受模具入模角的影響外，而未與模具其他部位接觸，所以可視為均勻變形，其變形狀態近似於自由成形。第二階段則是板片與模具底部表面開始接觸後至完全成形，在此階段板片由於受到與模具表面接觸所產生的摩擦力作用，使得板片的變形與金屬的流動受到影響，因此，加壓程序的差異會對本階段的變形狀態造成很大的影響。

### 3.2 加壓程序對厚度分佈的影響分析

圖 4 所示為不同加壓程序下，板片觸底前成形試件厚度分佈狀況。圖中顯示，厚度分佈具有明顯的梯度現象產生，其厚

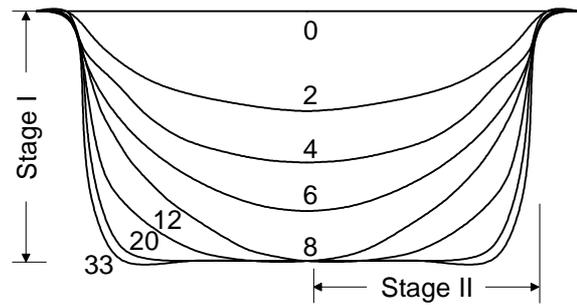


圖 3 吹製成形過程板片連續變形示意圖。

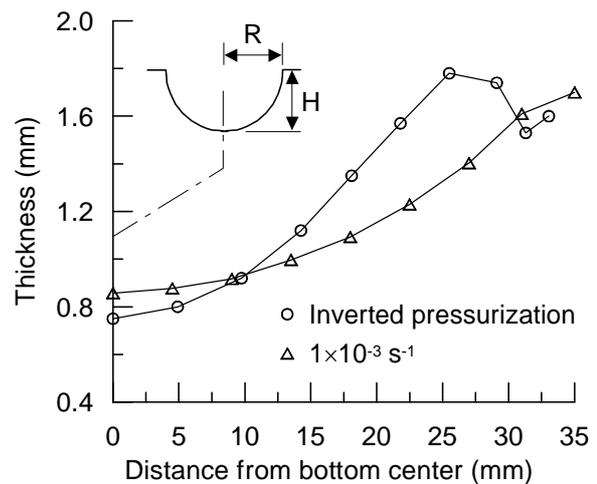


圖 4 自由成形階段，半球狀成形試件中，沿中心截面之厚度分佈。(a)等應變速率成形 (b)反向加壓程序成形

度是由中心向邊緣遞增，中心點呈現最薄的狀態。由於板片在成形過程第一階段也就是觸底前，其成形過程屬於半球形之自由成形狀態且板片未與模具接觸，除了入模角部分，模具的表面狀態及潤滑劑在此階段對其厚度分佈影響不大，其厚度分佈之變化主要取決於不同位置應變狀態對應變速率之影響。在半球形的成形過程中，其中央頂點部分為等軸應變狀態(Equibiaxial strain)，而受模具夾持之圓周部分，因受模具夾持作用，所以板片沿圓周方向的變形被制，這個位置則轉變為接近平面應變(Plane strain)的狀態。在觸底前之自由成形階段中，由於頂端部分至邊緣部分因應變狀態的不同，因而造成流變應力的梯度現象；在頂端部分之流變應力為最大，而逐漸向邊緣遞減。在中央頂點位置之流變應力最大，其應變速率也最大，因

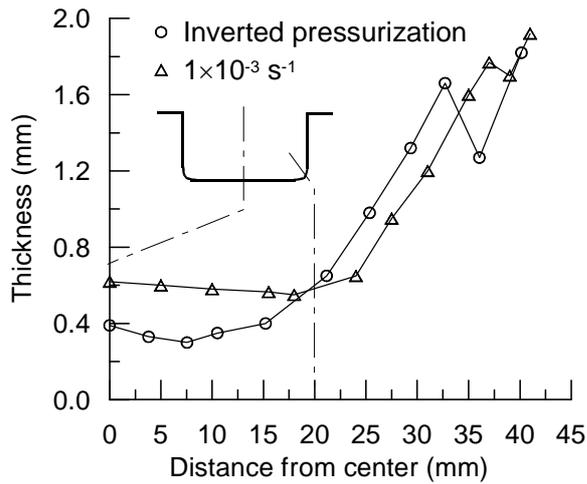


圖 5 完全成形試件中，沿中心截面之厚度分佈。(a)等應變速率成形 (b)反向加壓程序成形

而產生較快的變形效應，所以其厚度為最薄之部分；以等應變速率加壓程序完成之半球形試件，其中央點之厚度為0.86 mm，反向加壓之試件為0.75 mm。使用等應變速率成形需要約9分鐘的時間來完成半球狀的成形，而反向加壓程序僅需要65秒左右。在反向加壓成形過程中，由於具有較大的成形應變速率，對板片的變形造成較大的薄化效應，所以在第一階段成形試件中，其中央頂點的厚度較薄。

在成形過程的第二階段，板片開始與模具接觸，由於受到兩者接觸時所產生的摩擦力影響，因此造成板片厚度分佈不均勻的現象，所以潤滑劑及加壓程序在成形過程第二階段會對板片的金屬流及變形造成較大的影響。圖5為不同加壓程序下，板片完全成形試件中之厚度分佈。在未使用潤滑劑的超塑性成形過程中，當變形板片與模底接觸後，板片受模具表面摩擦力影響，使得已貼模區域受摩擦力牽制影響其變形，變形量較少會呈現厚度較厚的情形。因此，屬於最後成形階段之彎角處便需承擔大部份的變形量，使得彎角處成為試件厚度最薄處。在本文的實驗中，不論在何種成形加壓程序都使用了潤滑劑。潤滑劑改變了變形板片與模具間的接觸狀態，進而改善了完全成形試件中厚度的分佈狀態。

在等應變速率的加壓程序下，當板片完全成形後，成形板片最薄的位置是在最後成形之彎角處；也就是距離中央點大約20 mm的位置，其厚度約為0.55 mm，中央點位置的厚度約為0.62 mm，兩者之間相差約為11%。採用反向加壓程序之試件其厚度分佈與等應變成形有相當大的差別，在反向加壓程序下，成形板片最薄的位置並非位於底部彎角處，而是位於距離中央點約7.5 mm處。成形試件中最薄的厚度為0.3 mm，中央點厚度為0.39 mm，彎角處為0.65 mm。此項結果顯示，反向加壓程序可以大幅增加成形應變速率，降低成形時間，但是成形試件的厚度分佈會較不均勻。

加壓程序對厚度分佈所造成的影響，可以由變形過程中金屬流的狀態來說明；如圖6所示。由圖6(a)金屬流的變化狀態

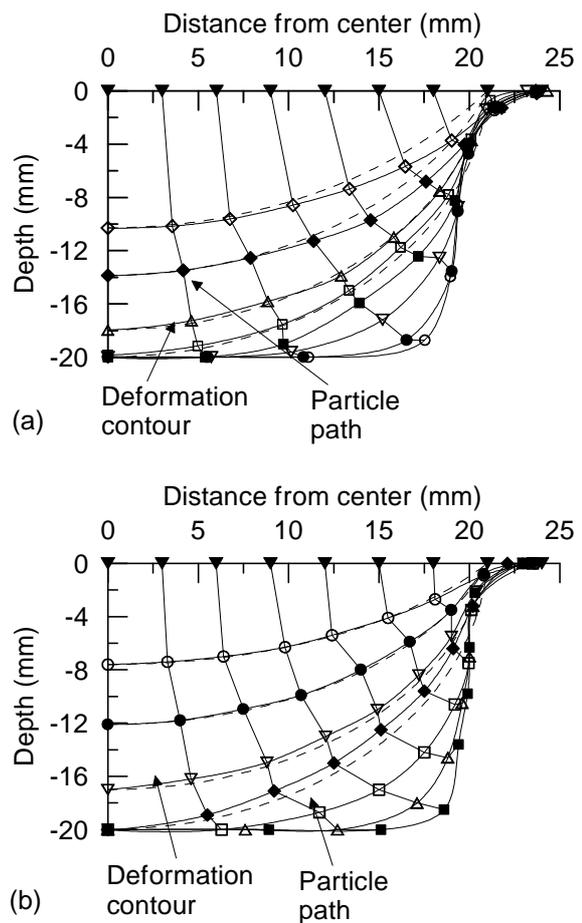


圖 6 不同加壓程序下，成形過程中不同階段試片上各點隨時間改變之位移路徑圖。(a) 等應變速率 (b) 反向加壓

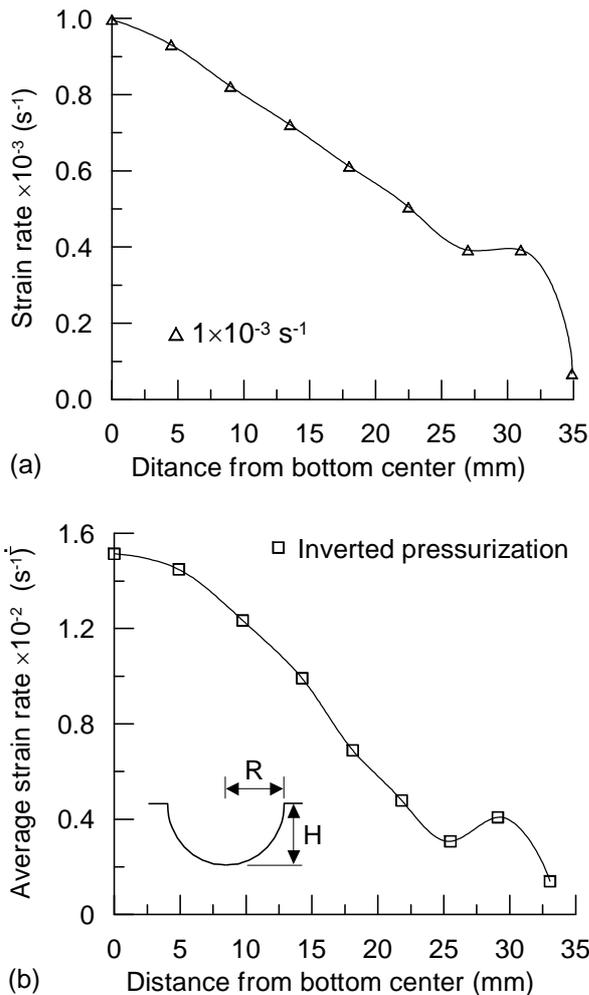


圖 7 自由成形階段，沿成形試件中心截面應變速率分佈圖。(a)等應變速率成形 (b)反向加壓程序成形

顯示，在接近完全成形的階段，使用等應變速率的加壓程序，金屬流是由底部中央及模具側邊向彎角處流動。但是在貼模後，金屬變形的流動距離並不是非常大。雖然在成形的最後階段，底部彎角處之薄化作用將金屬流拉向這個位置，底部彎角處仍有明顯的薄化現象產生。因此，這個區域通常是成形試件最薄的位置。在反向加壓的程序中，金屬流是由底部中央部份向模具側邊移動，板片貼模後金屬流仍有相當明顯的位移產生。在成形的後期階段中，底部的板片持續變形產生薄化作用，因而造成厚度最薄的部分出現在距離中央點約為7.5mm處。圖6(b)也同時顯示，模具表面摩擦力對薄化效應仍有影響。由於中央點位置是最早接觸模具底面的位置，摩

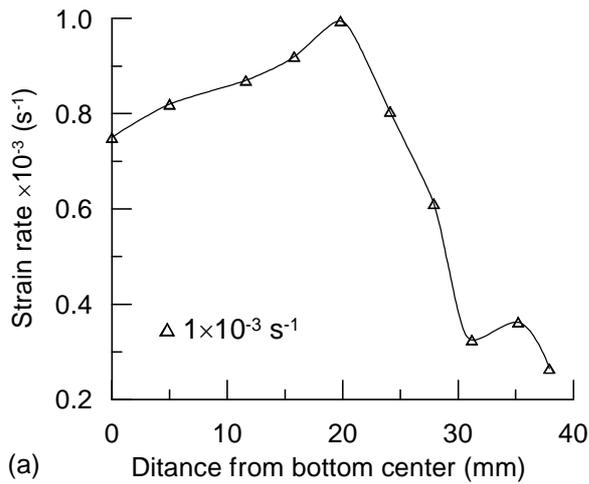
擦力限制了此點的金屬流動能力，所以降低了中央點位置的薄化效應。

### 3.4 成形過程中應變速率之分析

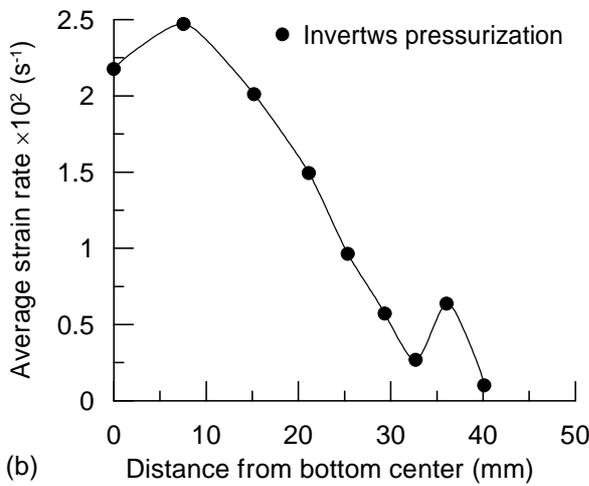
在超塑性成形過程中，板片上不同位置所承受的應變或應變狀態會不一樣，再加上板片貼模後，受到和模具間的摩擦力影響，各個位置之變形量及變形速率都會有所差別，因此在成形過程中，板片整體並非以單一的應變速率進行變形。

圖 7 為不同加壓程序下，板片在第一階段觸底前自由成形階段之應變速率分佈圖。在兩種不同加壓程序下，由於板片都尚未接觸模具底部，因此板片中央區域並未受到摩擦力之影響，而受模具夾持之邊緣區域，因受模具夾持作用，使得板片的變形受到限制，所以整體應變速率分佈都呈現出中央區域向邊緣區域遞減的情形。圖中顯示，在自由成形的第一階段，反向加壓程序變形過程的行為與等應變速率成形相當類似。而造成這種應變速率差異的現象，主要是因成形過程中，中央部分至邊緣部分的應力狀態不同，所造成流變應力呈現梯度分佈現象，因而導致應變速率分佈的差異。在觸底前之自由成形階段，板片之中央區域到邊緣區域間的流變應力分佈不同，其中以中央區域的流變應力為最大，往邊緣區域遞減，形成應力分佈的梯度現象。流變應力的梯度分佈，也會影響板片之厚度分佈。中央區域因流變應力最大，相對產生的應變速率也最快，產生較大的變形量，所以這個區域的厚度最薄。

圖8為不同加壓程序下，板片在完全成形階段之應變速率分佈圖。在傳統等應變速率的成形中，由於底部彎角處為板片最後貼附模具的部分，所以其應變速率是逐漸增加至完全成形，因此彎角處會有較大之平均應變速率。故最大應變量是發生在靠近底部的彎角部分；也就是在距離中央點位置大約20 mm的區域。但是由反向加壓程序下之結果顯示，最大應變量則是產生在靠近底部的中央區域，也就是在距離中央點位置大約7.5 mm的位置。此項結果同時表示，在使用不同加壓程序的成形過程



(a)



(b)

圖 8 不同加壓程序下，板片完全成形階段之應變速率分佈圖。(a)等應變速率成形 (b)反向加壓程序成形

中，會改變金屬流的狀態，因而改變應變的分佈狀態。

### 3.5 空孔狀態之分析

在超塑性變形過程中，成形過程中，試件內之空孔狀態及變化，原則上可以分為空孔生成(Cavity nucleation)、空孔成長(Cavity growth)及空孔結合(Cavity coalescence)等三個階段。變形過程中若有空孔生成時，則小尺寸的空孔及總空孔的數量會增加。當空孔產生成長及結合的現象時，大尺寸的空孔及較大空孔的數量會增加，不過空孔結合時也可能會減少總空孔數量。

在第一階段中，無論那一種加壓程序下，變形板片除了在入模角區域因受到模

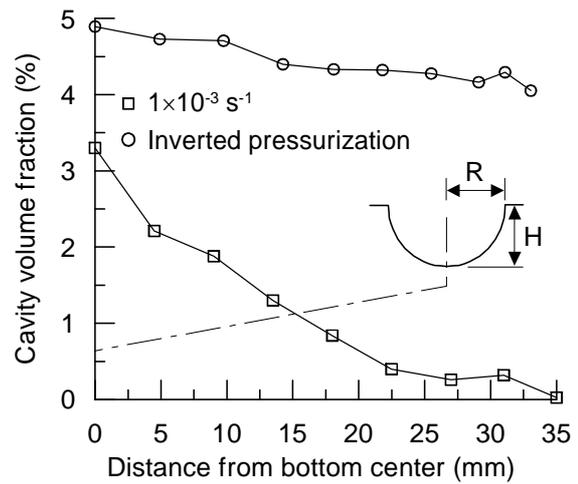


圖 9 不同加壓程序下，自由成形階段，半球狀成形試件中，沿中心截面空孔體積百分率分佈圖。

具夾持，限制其變形外，其餘區域都因尚未與模具接觸，所以其變形近似自由成形的狀態。在這個階段，成形應變速率的快慢，對於材料在成形過程中所產生之流變應力大小有著密切的關係。當應變速率小於某一臨界應變速率時，材料可藉由擴散應力鬆弛的作用，來避免空孔的產生。此臨界應變速率與晶界上的顆粒尺寸、晶界滑移在總應變量所佔的百分比、晶界擴散係數、流變應力及變形溫度都有關。在較慢的應變速率下，材料通常具有較小之流變應力，而且較慢的應變速率下，因為晶界滑移所產生的應力可以有較長的擴散調節時間，來達到鬆弛的作用，所以在較慢的成形速率下，可以減少空孔的生成，因而降低了空孔量。

圖 9 為不同加壓程序下，成形試件在未觸底前自由成形階段空孔體積百分率之分佈圖。由於在這個階段，板片中央區域並未受到摩擦力影響，僅有邊緣區域因受模具夾持而影響板片變形之流動性，所以整體空孔量的分佈也和前面幾節提到之應變、應變速率及應力狀態分佈相同，都呈現梯度分佈，由中央區域往邊緣區域遞減的現象。由圖中可以觀察到，雖然採用反向加壓程序的成形應變速率較快，但是其成形試件中，空孔體積百分率較等應變速率成形要少的多。這種現象主要和成形過

程中空孔的成長有關。本文所使用的反向加壓方式是具有背壓的成形程序，背壓在超塑性成形中可以減少空孔的成長。雖然反向加壓程序的成形應變速率較快，會導致空孔的生成率增加，但是所生成的空孔都是屬於非常小尺寸的小空孔，影響空孔百分率變化的因素主要是空孔的成長，所以，反向加壓程序可以減少空孔量。

圖 10 所示為不同加壓程序下，完全成形試件中，沿試件中心截面之空孔體積百分率之分佈圖。圖中顯示，完全成形試件中，空孔量的分佈狀態與厚度的分佈狀態有關，空孔量是隨著厚度的減少而增加。在傳統等應變速率的超塑性成形中，空孔面積百分率最大的位置是發生在板片底部彎角區域。由於底部彎角處為板片最後貼附模具的部分，同時也是厚度最薄的位置，然而厚度最薄的位置相對的有較大的應變量，也就是在彎角區域會有較大的拉伸應力，所以具有最大的空孔量。由反向加壓程序之結果顯示，空孔面積百分率最大的地方，則是產生在靠近底部的中央區域，也就是在距離中央位置大約 7.5 mm 的區域；這個位置同時也是厚度最薄的位置。這項結果顯示，反向加壓程序改變了成形過程中金屬流的狀態，導致成形試件中厚度分佈的改變，同時也改變了最大空孔量的位置。圖 11 所示為反向加壓程序成形過

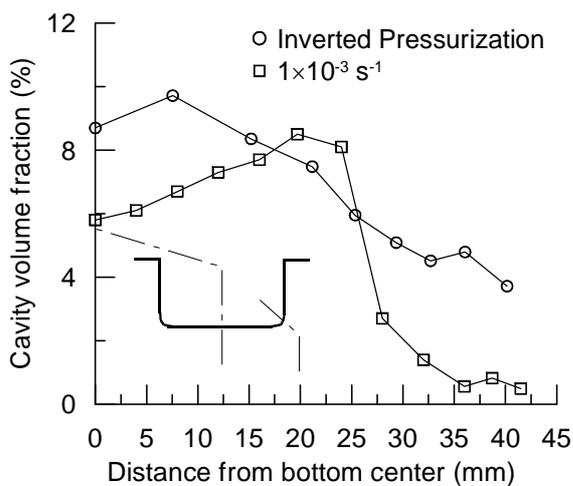


圖 10 不同加壓程序下，完全成形試件中，沿試件中心截面之空孔體積百分率分佈圖。

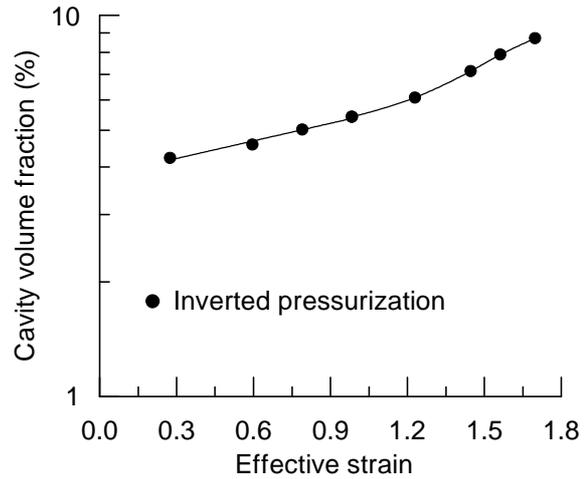


圖 11 反向加壓程序成形過程中，空孔量變化與有效應變間之關係圖。

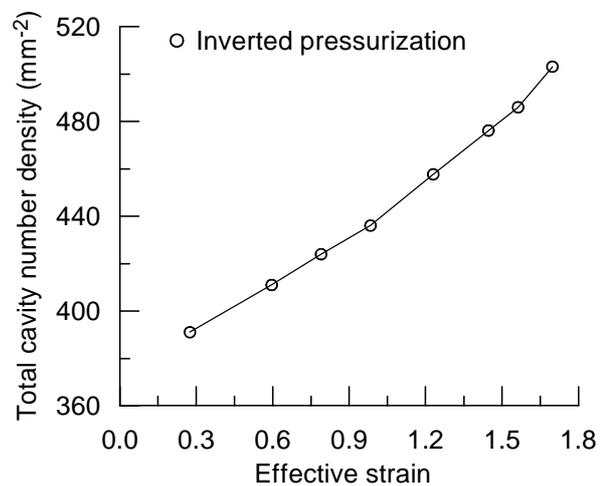


圖 12 反向加壓成形過程中，總空孔密度(單位面積總空孔數量)變化與有效應變間之關係。

程中，空孔量變化與有效應變間的關係。在半對數座標軸的圖 11 顯示，當有效應變量小於 0.98 時；也就是在自由成形的第一階段中，空孔體積百分率與應變呈現類似直線變化的關係。就應變控制空孔成長 (Strain controlled growth) 的機構而言，空孔量的變化應該與應變量呈現直線關係 [13,14]。這項結果表示，自由成形階段中空孔量的變化仍然符合應變控制成長機構的描述。

圖 11 同時顯示，當應變量大於 0.98 之後，空孔量的增加逐漸偏移線性關係，空孔量的增加速率較應變控制成長機構的預期為大，這種現象應該是空孔生成及結合

所造成的結果。由圖2的加壓程序中可以觀察到，本文所採用的反向加壓程序中，應變速率是隨著成形過程持續增加，因此，空孔的生成率也是隨著成形過程持續增加。由於應變控制成長機構的模式中並未考慮空孔的生成效應，所以當空孔生成率較大時，應變控制成長機構無法完全描述空孔量的變化狀態。圖12所示為成形過程中總空孔密度(單位面積總空孔數量)變化與有效應變間的關係。圖中顯示，總空孔密度隨著應變的增加而增加，而且在應變量大於0.98後，有較明顯的增加趨勢出現，所以，在較大變形量的狀態下，空孔量的增加受到空孔生成的影響。

#### 七、參考文獻

1. J. Pilling and R. Ridley, Proc. of Superplasticity in Aerospace, Phoenix, AZ, USA, TMS, 183-198 (1988).
2. A.K. Ghosh and D.H. Bae, Proc. of Superplasticity in Advanced Materials, ICSAM-97, Bangalore, Indian, Aedermannsdorf, Trans Tech Publications, 89-98 (1997).
3. C.C. Bampton M.W. Mahoney, C.H. Hamilton, A.K. Ghosh, and R. Raj, Metall. Trans., Vol.14A, 1583-1591 (1983).
4. M.J. Stowell, Failure of Superplastic Alloys, Metal Sci., Vol.17, 1-11 (1983).
5. R. Raj and M.F. Ashby, Acta Metall., Vol.23, 653-666 (1975).
6. C.H. Caceres and D.S. Wilkinson, Acta Metall., Vol.32, 423-434 (1984).
7. H.Y. Wu, Mat. Sci. Eng. A, A291, 1-8 (2000).
8. J. Pilling, and N. Ridley, Acta Metall., Vol.34, 1986, p.669.
9. J. Pilling, Mat. Sci. and Technol., Vol.1, 1985, p461.
10. C.C. Bampton and R. Raj, Acta Metall. Vol.30, 1982, p2043.
11. C.C. Bampton, A.K. Ghosh and M.W. Mahoney, Superplasticity in Aerospace - - Aluminum, Eds. R. Pearce and L. Kelly, SIS, Cranfield, Bedford, England, 1985, p1.
12. Optimas 5 Software, 6th edition, Optimas Corporation, Seattle, WA (1995).
13. J. Pilling and N. Ridley, Effect of Hydrostatic Pressure on Cavitation in Superplastic Aluminum Alloy, Acta Metallurgica, Vol.34, pp 669-679, 1986.
14. J. Pilling, Effect of Coalescence on Cavity Growth during Superplastic Deformation, Materials Science and Technology, Vol.1, pp 461-465, 1985.

#### 八、計畫自評

本研究依據原計畫目標完成加壓程序對超塑性成形特性之影響，完成之工作項目如下所述：

1. 完成不同加壓程序杯狀柱形試件之超塑性成形實驗；
2. 完成加壓程序對杯狀柱形試件超塑性成形過程之變形特性分析；
3. 完成成形試件之微結構空孔觀察；
4. 分析加壓程序數對成形試件空孔狀態的影響；
5. 分析加壓程序對空孔狀態之影響。

本計畫建立了加壓程序對超塑性鋁合金變形特性之影響研究。就研究成果之學術價值而言，適合在國外EI等級以上之學術期刊發表。研究成果以「加壓程序對超塑性5083鋁合金成形特性之影響研究」為題撰寫論文一篇，投送2005中國航太學會/中華航學會聯合學術研討會發表；擬投寄於國外學術期刊之論文正進行撰寫中。

本研究計畫之主要發現，而且也未在其它學術期刊所發表之重要成果包括下列所述之幾項：

1. 在吹製柱狀杯形試件的超塑性成形過程，板片的變形可以分為兩個階段來探討。在變形試片未與模具底部接觸的階段，其變形類似自由成形的狀態，所以由板片變形的初期至板片接觸模具底部前為成形之第一階段。當變形板片與模具底部接觸後，由於模具表面摩擦力的作用，其變形及空孔狀態與觸底前之自由成形過程都會有很大的差別，因此，由板片觸底後至完全成形為第二階

段。

2. 採用具背壓的反向加壓程序，較大的壓力可以增加成形應變速率，減短成形時間；與傳統  $1 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$  等應變速率比較，完全成形時間由 33 分鐘大幅降低為 78 秒左右。
3. 在第一階段的成形過程中，變形板片並未與模具接觸，所以其變形近似於自由成形狀態。在此階段中，反加壓程序與等應變速率成形的特性相當類似，成形試件的厚度、應變速率及空孔分佈都是呈現梯度狀態，除厚度是由試件的中央區域向邊緣區域遞增外，其餘則是遞減。
4. 板片在第二階段成形過程中，就等應變速率加壓程序而言，應變量最大的位置是在接近柱狀杯形零件之彎角處。此位置處於成形順序中較晚之成形區域，同時也是厚度最薄之處，因而具有較大之變形量。在反向加壓程序下，應變量最大及厚度最薄的位置則是在距離底部中央位置 7.5 mm 處。由於加壓程序的改變會造成板片變形過程中金屬流狀態的改變，因而導致成形試件中厚度分佈狀態的改變。
5. 在成形的第一階段中，不論何種加壓程序成形中，空孔量的變化是隨著應變量的增加而增加。空孔量的分佈呈現中央區域往邊緣區域遞減的梯度分佈。空孔量與有效應變間的變化關係，符合應變控制的成長機構。
6. 在反向加壓程序成形的第二階段中，當應變量大於 0.98 時，空孔量的增加速率較應變控制成長機構的預期為大。由於反向加壓程序所採用的壓力變化方式，在成形過程中應變速率是隨著成形時間持續增加，所以空孔量速率的增加應該是受到空孔生成的影響。