

# 中國海峽兩岸鋼鐵冶金 技術學術交流活動

## 研討會論文集

時間：一九九三年九月十五日至九月二十九日

地點：北京、重慶、宜昌、武漢、上海

台灣主辦單位：台灣大學材料科學與工程學研究所  
行政院青年輔導委員會

大陸主辦單位：北京科技大學  
重慶大學  
北京鋼鐵研究總院  
首都鋼鐵公司  
武漢鋼鐵公司  
宜昌冶金公司  
有色金屬研究總院  
重慶鋼鐵公司  
寶山鋼鐵公司

75 1-53  
T 12

# 中國海峽兩岸鋼鐵冶金 技術學術交流活動

## 研討會論文集

時間：一九九三年九月十五日至九月二十九日

地點：北京、重慶、宜昌、武漢、上海

台灣主辦單位：台灣大學材料科學與工程學研究所  
行政院青年輔導委員會

大陸主辦單位：北京科技大學  
重慶大學  
北京鋼鐵研究總院  
首都鋼鐵公司  
武漢鋼鐵公司  
宜昌冶金公司  
有色金屬研究總院  
重慶鋼鐵公司  
寶山鋼鐵公司

---

| 演 講 座 談 內 容          | 演 講 人 |
|----------------------|-------|
| 超塑性成型與擴散接合在鋼鐵工業之應用   | 莊 東 漢 |
| 鋼鐵之新精煉技術             | 連 雙 喜 |
| 金屬材料之雷射加工技術          | 陳 鈞   |
| 台灣鋼鐵工業現況             | 顧 鈞 豪 |
| 急凝固製成矽鋼片             | 郭 博 成 |
| 鑄造氣氛對急速凝固薄帶性質及表面形貌影響 | 郭 正 次 |
| 金屬鍍層與化學添加劑對鋼材氫脆之防治   | 吳 建 國 |
| 合金鋼的成份設計及熔煉          | 萬 其 明 |
| 碳鋼的軋延及後續加工           | 陳 瑞 凱 |
| 數學模擬在連續鑄造上的應用        | 黃 文 星 |



# 超塑性成形與擴散接合在鋼鐵工業之運用

莊 東 漢

國立臺灣大學材料科學與工程學研究所



超塑性成形與擴散接合在鋼鐵工業之運用  
Applications of Superplastic Forming and  
Diffusion Bonding in Steel Industry

莊 東 漢

Tung-han Chung

國立臺灣大學材料科學與工程學研究所  
Institute of Materials Science and Engineering,  
National Taiwan University

摘 要

超塑性成形與擴散接合技術在過去十年間受到航太工業之極度重視，成為鈦合金與鋁合金兩種主要之航太材料最具經濟效益之加工技術，將此二技術推廣至與民生用品息息相關之鋼鐵工業是未來一個極富潛力之開發市場。就超塑性成形技術而言，超塑性雙相不鏽鋼兼具高强度高抗蝕性及低價格等優點，正逐漸取代一般不鏽鋼結構件，超塑性超高碳鋼兼具高强度及令人滿意之延展性，成為齒輪或模具等形狀複雜且要求耐磨耗性機件的明日之星材料及加工技術；就擴散接合技術而言，除了取代傳統熔焊技術，鋼鐵材料之異質擴散接合更提供了鋼鐵合板及層狀鋼鐵複合材料兩種極富經濟價值材料之製造原理。

ABSTRACT

For the past ten years, superplastics forming and diffusion bonding have gained extensive attention in aerospace industry, becoming the most economical techniques used in processing titanium alloys and aluminum alloys - two major aerospace materials. To be able to extend these two techniques to the steel industry which concerns our daily life and applications is an explorable market rich in

like high strength, high corrosion resistance, low cost, and they have gradually replaced the traditional stainless steels for structural products. Superplastic ultrahigh carbon steels (UHCS) have both advantages of high strength and satisfactory ductility, which have made them the future necessary for producing and processing complex structural components such as gears and dies, which have high wear resistance. Regarding diffusion bonding, aside from replacing the traditional fusion welding technology, diffusion-bonding steels with dissimilar metals offers the principles for manufacturing clad steels and laminated steel composites.

『超塑性』(Superplasticity)<sup>1</sup>是指某些具有特定材質與材料，在特定之溫度與應變速率作用下，可產生極高之變形。一般而言，超塑性材料在組織上要求等軸及微細晶粒(μm)，並具有雙相結構，超塑性溫度大約發生在材料熔點(0.5T<sub>m</sub>)以上，應變速率約在10<sup>-4</sup>s<sup>-1</sup>，已知一些航空用鋁合金均具有優異之超塑性，其在適當條件下，變形率可達1000%，其它特殊成份之銅基、鎳基及鐵基合金亦已發現明顯之超塑性，並且已經商業化，隨著超塑性研究領域之蓬勃發展，包括介金屬合金、結構陶瓷、超導陶瓷、金屬基及陶瓷基複合材料等新興尖端材料實可經由特殊製程技術獲得超塑性<sup>2</sup>，表一為1991年在a所召開之『尖端材料超塑性國際會議』所歸納之各材料之超塑性最高記錄，由表中可以看出現今之超塑性已經含蓋了所有的工程材料，這使得超塑性之應用空間非常寬廣，也為各種難加工材料的突破困境提供了可能。

應用需求，利用材料超塑性已經發展出一種省能源之加工技術，亦即『超塑性成形』技術(Superplastic



Forming, SPF)<sup>3</sup>，由於超塑性材料具有極大變形量，使機械加工設計更加富有彈性，同時由於超塑性成形所需之應力極低，不僅使加工能量消耗大為減少，更可降低模具材料成本及模具之使用磨損，尤其對於板材之加工成形，可利用氬氣壓力吹製方式直接成形，即使是複雜形狀之結構件，亦可一次加工完成，免除了傳統大量組件鉚接方式所造成之許多缺點，這對於航太組件之要求減重及高度安全性尤其深具意義。除了習用之外加氬氣壓力吹製之超塑性成形方法，一種創新之『內壓式超塑性成形方法』亦已被提出<sup>4</sup>，此方法以固態高蒸氣壓物質預置於封閉模具內或兩片封閉之超塑性板材間，加熱至板材之超塑性溫度，同時藉溫度之提昇，將高蒸氣壓物質蒸發以作為超塑性成形壓力之來源，此方法不須於開製模具時留下氣體通路，可大幅減低模具之複雜程度，並且針對生產成本及產品品質提供了許多改良功效。另外對於塊狀之超塑性材料，同樣可以利用其超塑性而進行超塑性鍛造成形<sup>5</sup>或超塑性軋軋成形。

『擴散接合』(Diffusion Bonding, DB)<sup>6</sup>又稱為『固態接』，是利用材料固態擴散及界面運動之原理，使其在熔點以下加溫加壓自然接合，亦即材料在接合面並無熔融現象，此有別於傳統熔焊及硬焊之『液態接合』，因而可有效避免一般熔焊常見之熱脆及凝固脆裂問題，材料尺寸亦不因接合發生改變，為一極具應用潛力之現代接合技術，尤其針對一些傳統熔焊方法無法勝任或極為困難之接合構件，擴散接合常被尋求作為一可能取代之方法，擴散接合之溫度一般約為材料熔點的0.53至0.88倍，所施加之壓力通常低於材料之降伏點，亦即材料在宏觀上並未發生塑性變形，然而在特殊製程，亦可能施加遠高於材料降伏點之壓力，例如經由鍛造或軋軋以達到擴散接合所需之壓力，接合時間一般約1至2小時，然而對於特定材料(例如鋁合金與不鏽鋼之異種材料接合)或一些特殊製程，亦可能在極短時間(小於10分鐘)<sup>7</sup>完成擴散接合。實際上，接合過程中變更其溫度、壓力、時間參數所發展成之『兩段式擴散接合製程』(圖 1)，亦已證實可得到一些更有利之接合效果與製程設計<sup>8</sup>。

。擴散接合製程之關鍵問題在於無法精確預測接合完成時間(接合時間隨著接合工件之材質、形狀、接觸表面狀態等而有極大差異)，以致造成接合時間不足而影響接合強度，或接合時間過長而浪費能源並使材質高溫劣化，針對此問題，一種利用超音波臨場監測接合表面之改良方法已被提出<sup>10</sup>，此方法並可被發展為擴散接合之自動化製程。

由於『超塑性成形』與『擴散接合』之基本製程條件相似，尤其在操作溫度上兩者相近，因此在實際工程上可同時進行，亦即將『超塑性成形』(SPF)與『擴散接合』(DB)合併成為一極具效率之『超塑性成形/擴散接合』(SPF/DB)複合加工技術<sup>11</sup>，此技術目前已成為航太材料最先進之材料加工方法，並已受廣泛的重視<sup>12</sup>。對於一些擴散接合較困難之材料(例如鋁合金)，其它取代之方法亦已陸續被提出，包括『超塑性成形/過渡液相接合』(SPF/TLB)<sup>13</sup>及『超塑性成形/硬焊接合』(SPF/BW)<sup>14</sup>等複合加工技術。

由於航太工業之高度需求，超塑性成形與擴散接合在過去十年間主要被應用於鈦合金(Ti6Al4V 及 Ti6Al6V2Sn)與鋁合金(7475Al2nMg、2090 及 8090AlLi)兩種航太結構材料，然而將此二技術擴展至與民生用品息息相關之鋼鐵工業則是未來極富潛力之開發市場，尤其在目前全球航太工業景氣低迷的情況，鋼鐵工業將可提供超塑性成形與擴散接合技術另一個發展空間。

## 貳、鋼鐵材料之超塑性成形及其運用

鋼鐵材料可經由不同的熱處理或熱機處理條件以獲得各種微結構組織，因此可設計使其具有超塑性，一般超塑性鋼鐵組織包括雙相及顆粒穩定兩種，而其最典型之商業化產品即為雙相不鏽鋼與超高碳鋼。

### 一、雙相不鏽鋼(Duplex Stainless Steels, DSS)

雙相不鏽鋼主要內含大約相等體積比之肥粒鐵相與奧斯田鐵相，與一般奧斯田鐵系不鏽鋼比較，雙相不鏽鋼具有較高強度、較佳抗蝕性及較低價格等多重優點<sup>15</sup>，表二為一些已商業化之雙相不鏽鋼成份。通常將雙相不鏽鋼在其( $\gamma + \delta$ ) 雙相溫度區間進行熱機處理可得極微細晶粒之結構，而使材料具超塑性，目前已經商業化之超塑性雙相不鏽鋼主要有IN744(成份為Fe-26Cr-6.5Ni) 及Superdux 64(成份為Fe-24.5Cr-5.8Ni-3.3Mo-1.9Cu) 兩種，其超塑性伸長率均可達到1000%。

比較Superdux 64 超塑性雙相不鏽鋼與一般奧斯田鐵系不鏽鋼之機械性質(表三)可見到其具有較高之強度，另外其腐蝕性質亦較一般不鏽鋼為佳，由於這些優異之特性，Superdux 64(及最近改良之Superdux 65)已逐漸取代民航機內的許多不鏽鋼結構組件，包括：熱遮護板、盥洗用具及液滴蓋等。圖2 為一紅外線感測冷卻劑容器應用例。

為了有效建立Superdux 64 雙相不鏽鋼之超塑性成形基本製程與材質變化資料，利用圖3之實驗裝置對此材料進行氬氣吹製(Ar-gas blowing)之超塑性成形，此裝置可利用LVDT自動量測材料之超塑性成形量，並經由電腦連續計錄，實驗可得到不同溫度、氬氣壓力及時間下Superdux 64 板材之成形高度比(成形高度/工件直徑)示於圖4。金相顯示原來的Superdux 64 超塑性雙相不鏽鋼晶粒具有明顯的軋軋方向性(圖5a)，此一軋軋方向性在單純之熱處理很難被消除(圖5b-5h)，然而經過各種溫度超塑性成形後，材料晶粒之軋軋方向性均完全消失(圖6)，顯示超塑性成形之粒間滑移及粒間運動現象使其晶粒結構發生劇烈改變。比較原來之Superdux 64 雙相不鏽鋼與其它常用之不鏽鋼(SAE430, 304及316)之極化曲線，可證實其具有優異之抗蝕性(圖7)，然而經過超塑性成形後，其腐蝕性質嚴重劣化(圖8a)，與不同溫度熱處理後材料之腐蝕性質變化比較(圖8b)，此一超塑性成形所造成腐蝕性質劣化遠大於熱處理對腐蝕性質之效應。比較原來Superdux 64 雙相不鏽鋼與不同溫

度熱處理後及不同溫度超塑性成形後之微硬度值(表四)，顯示與熱處理溫度或超塑性成形溫度均有密切關聯。綜合此機械性質之改變與前述腐蝕性質劣化現象，Superdux 64雙相不鏽鋼於超塑性成形後必須再進行適當之後熱處理(post heat treatments)。

## 二、超高碳鋼(Ultrahigh Carbon Steels, UHCS)

含碳量 1.0 至 2.1 % 之超高碳鋼經特殊熱機熱處理<sup>16</sup>，可得到晶粒尺寸小至 0.5-2.0 $\mu$ m 之肥粒鐵基地內含 0.1-1.5 $\mu$ m 顆粒尺寸之球狀化雪明碳鐵，如此超微細組織之超高碳鋼將在其 A<sub>1</sub>溫度(727 °C)附近展現優異之超塑性，以一含碳量 1.6% 之超高碳鋼為例，Wadsworth 與 Sherby 在 650 °C 獲得 1155 % 之伸長率<sup>17</sup>。

由於其本身之超微細結構，超塑性超高碳鋼亦具有極佳之常溫機械性質，以一含碳量 1.0 % 之超塑性超高碳鋼為例，其常溫伸長率與一般 1020 碳鋼相近(30 %)，但其降伏強度可達 110 ksi，約為 1020 碳鋼的 3 倍，而一含碳量 1.4 % 之超塑性超高碳鋼之降伏強度高達 220 ksi，仍可維持約 5 % 之常溫伸長率。

利用超塑性超高碳鋼製作斜齒輪為其最典型之應用例<sup>16</sup>，由於在超塑性成形後施以適當之熱處理可使此材料之硬度大幅提高至 Rc=68，無需滲碳等表面硬化處理，工件即具備足夠之耐磨性，同時其常溫機械性質亦較一般齒輪鋼為佳，此一應用例可推廣至其它形狀複雜之耐磨機械組件，例如：汽車驅動機構零件及塑性加工模具。

對於超高碳鋼之超塑性成形目前仍主要限於熱壓鍛造法，亦即『超塑性鍛造』(Superplastic Forming)；經由添加合金元素(例如 3% Si 及 1.5% Cr)已被證實可降低超塑性流變應力(例如 800 °C 及  $10^{-4}$  s<sup>-1</sup> 應變率下，流變應力為 1500 psi)，使此材料未來有希望採用一般氬氣吹製法進行超塑性成形加工(目前

航太工業以氬氣吹製方式超塑性成形鈦合金板材所使用之氬氣壓力一般均低於300 psi，而成形鋁合金板材之壓力則低於100 psi，其它商業化之超塑性合金板材，例如Inconel 718 超塑性超合金<sup>18</sup>以及前述之IN 744及Superdux 64超塑性雙相不鏽鋼之超塑性成形氬氣壓力亦均低於400 psi )。

### 參、鋼鐵材料之擴散接合及其應用

一般而言，同種碳鋼之擴散接合性極佳，不僅接合完成後其原來之接合界面可完全消失，接合樣品進行拉伸試驗亦大多不會沿著原來的接合界面斷裂，亦即兩塊材料完全合而為一。對於一些合金鋼或鑄鐵之同種材料擴散接合，界面可能形成脆性金屬間化合物，而影響其接合強度，此時可先在材料之待接合表面鍍鎳或於兩塊待接合材料之間夾入鎳薄片，同樣可得到令人滿意的擴散接合效果。圖 9為S45C碳鋼、304 不鏽鋼及4130合金鋼之同種材料擴散接合後之界面結構<sup>19</sup>。

對於不同種類鋼鐵材料之擴散接合或鋼鐵材料與其他非鐵金屬之擴散接合則視接合材料之不同組合而有極不同之接合結果，適當選擇接合溫度與時間，以控制接合界面之金屬間化合物形成，或加入特定之中間金屬夾層以阻隔待接合之兩種材質界面反應，均可有效改善其接合效果。圖10為S45C碳鋼/304不鏽鋼，4130合金鋼/304不鏽鋼及FeAlMn鋼/316不鏽鋼之異質擴散接合界面<sup>19</sup>。

在鋼鐵材料之異質擴散接合中最受重視的是鋼鐵與鋁合金之接合，此一異種材料組合具有極高之應用價值<sup>20</sup>，然而直接之擴散接合將由於界面形成脆性之鐵鋁金屬間化合物而效果不佳，由許多研究報導顯示加入銀或鋅／銀之中間金屬夾層可有

擴散接合結果<sup>8,20</sup>。

不鏽鋼／鈦合金之異質擴散接合以及鈦合金之超塑性  
作完成之鈦合金空心浮球(圖11)主要應用於化工廠  
控制元件<sup>21</sup>，在此一應用實例中亦證實了不鏽鋼與  
鈦合金達到理想之擴散接合效果，圖12為其擴散接合界面<sup>22</sup>。  
鋼鐵材料之異質擴散接合原理，同時亦發展出兩種極  
直之材料製程與加工應用例，此即鋼鐵合板與層狀鋼  
管之製造。

#### 合板(Clad Steels)

熱軋方式使一片鋼板(稱為底材，backing metals)  
金屬板(稱為覆材，cladding metals)經由擴散接合  
成複合板，通常作為底材之鋼板主要為碳鋼或合金鋼  
覆材之金屬板視其使用需求條件包括不鏽鋼、鎳及鎳  
及銅合金、鈦及鈦合金、鋁及鋁合金等，覆材厚度大  
複合板的10%至20%。

在鋼鐵合板中，底材因使用碳鋼或合金鋼，價格極為  
具有足夠之強度，覆材則依不同之金屬材質而可滿足  
抗氧化、耐磨耗、熱傳導或低污染等不同使用需求，  
材料發揮最高經濟效益。

合板之製作流程可用圖13加以說明<sup>23</sup>，首先將底材及  
覆材，相互疊合於封罐內，必要時需將覆材於疊合前  
以促進擴散接合及阻礙金屬間化合物之形成，疊合後  
面必須噴塗離型劑，以避免和封罐材料產生接合，然  
周圍焊接密封，再由原來預置之抽氣孔將封罐內抽成  
真空，然後將封罐移入熱處理爐中加熱至熱軋溫度，隨即移至熱軋機連同  
進行熱軋，此時底材鋼板即與覆材金屬板發生固態擴  
散接合，完成後，打開封罐，取出鋼鐵合板。

合板目前主要應用於石油、化學、造紙及食品等工業  
力容器，現場使用經驗及實驗室測試均顯示此種材料  
能，尤其在承受長期溫度與壓力循環，底板與覆材間  
未受損，合板本身強度亦維持不變。除了壓力容器之

應用，鋼鐵合板亦已逐漸使用於船舶、海洋構造物及橋樑等設施以及一些高腐蝕性化學工業所需之容器及管路，其他如高溫焚化爐、廢水處理設施以及廢氣脫硫裝置等環保設施亦將成為鋼鐵合板之重要應用市場。

將一不具超塑性之粗晶粒肥粒鐵系不鏽鋼與一超塑性超高碳鋼擴散接合製成之複合板已被發現具有超塑性<sup>24</sup>，此一結果顯然對於材料超塑性之機理研究及工程應用提供了另一極具開發價值之園地，有系統的探討各種同質及異質超塑性／非超塑性複合板材之性質與變形機理目前正本實驗室進行中。

## 二、層狀鋼鐵複合材料(Laminated Steel Composites)

類似前述鋼鐵合板之製造流程，將多片金屬板材疊合，並利用熱軋軋方式進行接合，可製成特殊之層狀複合材料。

同質層狀複合材料開發之主要需求目的在於針對特殊塊狀材料之製造，最典型之實例為將急冷凝固之非晶態金屬薄片製成非晶態金屬塊材，另一實例為利用此法以製作金屬基複合材料。

異質層狀複合材料之開發則主要基於兩個不同的需求目的，一為針對提高材料之耐衝擊性與破壞韌性，其原理在於裂縫尖端可經由脫層現象而鈍化或轉折，另一目的則是使材料具備特殊之性能，例如用以製作功能階梯材料(functional gradient materials)或提供材料減振、改變物理性質(導電、導磁、導熱、比重)等特殊功效。

由非超塑性碳鋼與超塑性超高碳鋼所製作之層狀鋼鐵複合材料已被證實不僅其耐衝擊性較原來之碳鋼及超高碳鋼為佳，其高溫拉伸試驗亦展現明顯的超塑性<sup>16</sup> (應變速率敏感係數為0.3, 伸長率超過400%)，亦即一不具超塑性之材料可經由與另一超塑性材料形成層狀複合材料而獲得超塑性，此一結果同樣的對於材料超塑性之機理與應用開闢了另一值得深入探討的研究領域。

#### 肆、結論

超塑性成形與擴散接合為航太工業最具經濟效益之加工技術，主要用於鈦合金與鋁合金結構組件之製造，然而此二技術在鋼鐵工業亦有極高之應用潛力。商業化之超塑性雙相不鏽鋼可同時兼具有極佳之抗蝕性、高強度與低價位，並且已逐漸取代民航機上許多不鏽鋼結構組件，針對 Superdux 64 雙相不鏽鋼之超塑性成形基本製程參數與超塑性成形後之金相組織、腐蝕性質和機械性質已進行一系列之研究；另外一類倍受矚目之超塑性鋼鐵材料則為超高碳鋼，其高強度與足夠之延展性成為一些形狀複雜之耐磨組件未來可能選用之材料。鋼鐵材料一向具有優異之擴散接合性，即使是與其它不同種材料進行異質擴散接合亦已證實可獲得令人滿意之接合效果，利用鋼鐵材料優秀之異質擴散接合性，目前更已發展出鋼鐵合板與層狀鋼鐵複合材料兩種新的材料製程技術，其中鋼鐵合板組合了底材（鋼鐵）之高強度、低價格優點與覆材（其它金屬）之抗蝕性、耐磨耗性、抗高溫氧化性等特色，使材料功能發揮到極致；而層狀鋼鐵複合材料兼具耐衝擊性與其它特殊功能，尤其將非超塑性鋼材與超塑性鋼材組合成的層狀鋼鐵複合材料所顯現之特殊性能提供了超塑性機理研究與工程應用一個極吸引人的未來開發園地。

#### 伍、註謝

本次『兩岸鋼鐵技術交流研討會』活動感謝行政院青輔會之經費補助，本論文相關研究感謝國科會工程處重點研究羣計畫「航太材料超塑性成形與擴散接合研究」與臺灣大學工學院重點研究的長期支持以及臺灣大學材料科學與工程學研究所「材料加工實驗室」歷屆研究生的貢獻。



## 、参考文献

1. K.A. Padmanabhan and G.J. Davies, *Superplasticity*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, (1980).
2. T.G. Langdon and J.Wadsworth, "Summary and Topics of ICSAM-91", *Proc. Superplasticity in Advanced Materials*, Osaka, Japan, (1991) P.851.
3. C.H.Hamilton and L.A.Ascani, "Method for Superplastic Forming of Metals with Concurrent Diffusion Bonding", U.S. Patent 3920175, 18 November 1975.
4. 莊東漢, 徐景馨, "內壓式超塑性成形方法", Chin. & U.S. Patents, submitted(1993).
5. H. Schelosky, "Beitrag zum Verhalten Superplastischer Werkstoffe beim Massivumformen", Verlag W. Girardet, Essen, Germany, (1976).
6. N.F.Kazakov, *Diffusion Bonding of Materials*, translated from Russian by B.V.Kuanetsov, Pergamon Press, Oxford, (1981).
7. R.Lison and J.F.Stelzer, "Diffusion Welding of Reactive and Refractory Metals to Stainless Steel", *Weld. Res. Suppl.*, October, (1979) pp.306s-314s.
8. P.D.Calderon, D.R.Walmsley and Z.A.Munir, "An Investigation of Diffusion Welding of Pure and Alloyed Aluminum to Type 316 Stainless Steel", *Weld. Res. Suppl.*, April, (1985) pp.104s-112s.
9. T.H.Chung and Y.C.Pan, "Untersuchungen zum Diffusionsschweißen einer Ni<sub>3</sub>Al Legierung", *Schweißen u. Schneiden*, 44(1992) pp.559-564.
0. 莊東漢, "擴散接合製程監控方法及裝置", Chin. Patent, 發明專利第 58277 號(1992).
1. E.D.Weisert and G.W.Stacher, "Fabricating Titanium Parts with SPF/DB Process", *Metal Progress*, March (1977) pp.33-37.
2. W.Beck and P.J. Winkler, "Metallkundliche und Fertigungstechnische Aspekte zur Superplastische Umformung von Ti6Al4V", *Werkstoffe hoher Beanspruchung am Beispiel der Luftfahrt*, DGM, (1982) pp.129-135.
3. K.F.Sahm and R.Holbein, "Verfahren zur Herstellung von Integralen