

出國報告(出國類別：其他(開會))

國防專技計畫-高性能超合金特殊成型及接 合關鍵技術出國報告

服務機關：國防部軍備局中山科學研究院

姓名職稱：楊 振 聘用技士

派赴國家：美國

出國時間：101.09.08~101.09.15

報告日期：101.10.01

國防部軍備局中山科學研究院出國報告建議事項處理表

報告名稱	國防專技計畫-高性能超合金特殊成型及接合關鍵技術出國報告		
出國單位	第五研究所	出國人員級職/姓名	聘用技士/楊 振
公差地點	美國	出/返國日期	<u>101.09.08</u> / <u>101.09.15</u>
建議事項	<p>1.超合金在核能、航空及國防工業武器系統等方面都佔有極重要的地位，因其需求特殊，世界各國均將其列為戰略物資，並將相關技術列為管制機密，本院為國內少數具發展合金設計及相關製程技術能量之單位，可著力發展新型超合金及其衍生技術，以厚植國力。</p> <p>2.高溫超合金主要應於渦輪引擎熱段零組件，本院具有完整的超合金熔煉及精煉能力，同時具有電漿噴塗表面改質能量，初期可推廣應用於燃氣渦輪機葉片開發，提高國內重工業技術水準。</p> <p>3.超合金特殊成型技術已備受重視，葉輪成型已成為關鍵性技術，可配合現有之精密鑄造技術持續發展此一技術。</p>		
處理意見	<p>1.本院所發展之超合金熔煉技術在國防工業應用上已有相當的基礎，利用國防上之超合金熔煉技術，已衍生出各種靶材熔煉技術應用於民生工業，同時現階段正採購中之電子束熔煉設備，未來更可以新熔煉方式開發新型超合金，以厚植國防工業實力。</p> <p>2.本院已有渦輪葉片研製能力，現階段將著重於燃氣渦輪機葉片開發整合，從超合金熔煉、葉片製作至絕熱噴塗，建立完整的葉片製程能量，以配合國內國防工業需求，提升科技發展水準。</p> <p>3.本院精密鑄造超合金技術已有相當之基礎，未來更將配合快速模具技術，開發新型陶模，製作更短、小、輕、薄之超合金產品，以提高國內國防工業技術水準。</p>		

國防部軍備局中山科學研究院
一〇一年度出國報告審查表

出國單位	第五研究所	出國人員 級職姓名	聘用技士 楊 振
單 位	審 查 意 見		簽 章
一級單位	<p>一、超合金已是未來工業發展中不可或缺的材料，本院轉型在即，未來組織亦將考量推動相關技術能量的整合及加強上下游的合作關係，以提升本院未來競爭力。</p> <p>二、本報告內容均屬研討會中匯集已公開之技術資訊，未涉本院研發機密。</p>		<p>第五研究所 倪國裕 1011002180</p> <p>中山科學研究院 薄慧雲 第五所副所長 1011026100</p> <p>中山科學研究院 葛平亞 第五所所長 1011024165</p>
計 品 會	<p>本次公差參加2012年國際超合金研討會，有助於了解先進國家的超合金技術發展現況，達成派差之目的。</p>		<p>計品會 魏漢東 專任委員 10110251300</p> <p>計品會 萬紹平 第研室主任 1011026130</p> <p>中山科學研究院 鄭明傑 計品會副主委 10110261225</p>
保 防 安 全 處	<p>已完成保密檢審作業，對於貴單位認定以一般資訊發表，本處敬表同意，無附加審查意見。</p>		<p>第五研究所 楊耀宗 保防官 1011020140</p> <p>中山科學研究院 高學文 保防安全處處長 10110330100</p>
企 劃 處	<p>一、本案列本院 101 年出國計畫 101028 號，參加「2012 年第 12 屆國際超合金研討會」，蒐集最新超合金材料及製作技術，報告內容符合核定出國計畫及事由。</p> <p>二、本次公差聆聽國際學者演講，返國後已與計畫有關同仁分享心得。本報告業經保防單位審核，資料可公開。</p> <p>三、請將奉核報告電子檔及紙本裝訂 5 份送本處續辦。另請於返國後 3 個月內，將報告電子檔登錄行政院資訊網及本院圖書館工作報告資訊網。</p>		<p>企劃處 梁瓊真 科技組秘書 10110311310</p> <p>企劃處 嚴家仁 科技組副組長 10110311440</p> <p>企劃處 吳炳文 科技組組長 10110311525</p> <p>中山科學研究院 葉德華 企劃處副處長 1011010750</p>
批			示
<p>10111020750</p>			

國外公差人員出國報告主官（管）審查意見表

針對楊員赴美參加2012年第12屆國際超合金研討會之建議事項，本院在超合金相關之開發、整合已具備相當能量，其中超合金真空熔鑄所衍生之靶材製程技術已成為技轉最佳案例之一，目前亦正採購電子束熔煉設備，用以開發新型超合金，不僅能滿足計畫需求提供國內廠商自主技術，亦求追上國外現今正在發展中之技術。另外，由於本院也具備完整的電漿噴塗能力，經表面改質後更可提高超合金之高溫性質及操作溫度，目前正積極與漢翔公司及台電公司洽談燃氣渦輪機葉片開發製作事宜，以將該技術應用於本院自製產品，從超合金熔煉、葉片製作至絕熱噴塗，建立完整的葉片製程能量，配合國內國防工業需求，提升科技發展水準。

第五研究所
冶金組組長
倪國裕
10110021000

中山科學研究院
第五所副所長
薄慧雲
10110161000

出國報告審核表

出國報告名稱：國防專技計畫-高性能超合金特殊成型及接合關鍵技術出國報告		
出國人姓名 (2人以上，以1人為代表)	職稱	服務單位
楊振	聘用技士	國防部軍備局中山科學研究院
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input checked="" type="checkbox"/> 其他 (開會) (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	
出國期間：101年09月08日至101年09月15日	報告繳交日期：101年10月01日	
計畫主辦機關審核意見	<input checked="" type="checkbox"/> 1. 依限繳交出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 2. 格式完整 <input checked="" type="checkbox"/> 3. 無抄襲相關出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 4. 內容充實完備 <input checked="" type="checkbox"/> 5. 建議具參考價值 <input checked="" type="checkbox"/> 6. 送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 7. 送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 8. 退回補正，原因： <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> 抄襲相關出國報告之全部或部分內容 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input checked="" type="checkbox"/> 9. 本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： <input checked="" type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會(說明會)，與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 其他 本報告已於101年09月28日完成組內同仁知識分享。 <input type="checkbox"/> 10. 其他處理意見及方式： 敬會：保防官及保防督導官 本件報告僅為赴美參訪2012年第12屆「國際超合金研討會」出國報告資料，該內容屬於已公開技術資訊，未涉及科研或國防相關研究，非屬「國家機密保護法」及「軍事機密與國防秘密種類範圍等級劃分準則」等法規所列範疇；故本案列屬一般性文件。	
	計畫組： 第五研究所 計管組資訊員 楊嫻嫻 10110040830 第五研究所 計管組副組長 陳彥良 10110041010	
審核人	出國人員	初審(業管主管) 機關首長或其授權人員
	第五研究所 冶金組技士 楊振 10110040830	第五研究所 冶金組組長 倪國裕 10110021600 中山科學研究院 第五所副所長 薄慧雲 10110161000 中山科學研究院 第五所所長 苗平亞 10100416

說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「政府出版資料回應網公務出國報告專區」為原則。

報 告 資 料 頁			
1.報告編號： CSIPW-101Z-D0004	2.出國類別： 其他(開會)	3.完成日期： 101.10.01	4.總頁數： 31
5.報告名稱：國防專技計畫-高性能超合金特殊成型及接合關鍵技術 出國報告			
6.核准 文號	人令文號 部令文號	101.09.06 國人管理字第 1010011745 號 101.09.04 國備獲管字第 1010013378 號	
7.經 費		新台幣：106,652 元	
8.出(返)國日期		101.09.08 至 101.09.15	
9.公 差 地 點		美國	
10.公 差 機 構		2012 年第 12 屆國際超合金研討會	
11.附 記			

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：國防專技計畫-高性能超合金特殊成型及接合關鍵技術出國報告

頁數 31 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

國防部軍備局中山科學研究院/楊 振/03-4712201-357050

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

楊 振/國防部軍備局中山科學研究院/五所冶金組/聘用技士/03-4712201-357050

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他(開會)

出國期間：101.09.08~101.09.15 出國地區：美國

報告日期：101.10.01

分類號/目：

關鍵詞：超合金、合金設計

內容摘要：(二百至三百字)

所謂的超合金是指被發展來使用於高溫的合金，超合金一般分為三大類：鎳基、鈷基及鐵基超合金。除了鐵鈷鎳之外，尚含有鉻、鎢、鋁、鈦、鈮……等元素。在現代科技與經濟快速發展的情況下，與不同的高溫工程相關的高溫設備種類繁多，這些設備中的各種高溫零組件往往起著關鍵性的作用，所承受的溫度範圍寬廣，接觸的種類多樣，受力的大小和性質複雜多變，超合金由於具有高溫強度及韌性佳、高溫應力破斷性能佳，具良好之高溫抗潛變性能、熱疲勞壽命長、耐高溫氧化及應力腐蝕等特性，因此，在核能、航空及國防工業武器系統等方面都佔有極重要的地位，因此超合金材料技術發展之能量及成效往往可用來衡量一個國家國防工業發達與否之重要指標。

目 次

壹、目的.....	9
貳、過程.....	9
參、心得.....	14
肆、建議事項.....	30
附 件：2012 年超合金研討會議程表.....	31

國防專技計畫-高性能超合金特殊成型及接合關鍵技術 出國報告

壹、目的

為執行「國防專技計畫-高性能超合金特殊成型及接合關鍵技術」，赴美國賓夕法尼亞州參加「2012年第12屆國際超合金研討會」，與國外專家及學者共同研討超合金材料及製程技術。藉以瞭解及蒐集最新超合金材料及製作技術等資訊，做為國防專技計畫發展高性能渦輪引擎用超合金特殊成型及接合關鍵技術之參考。此次公差目的如下：

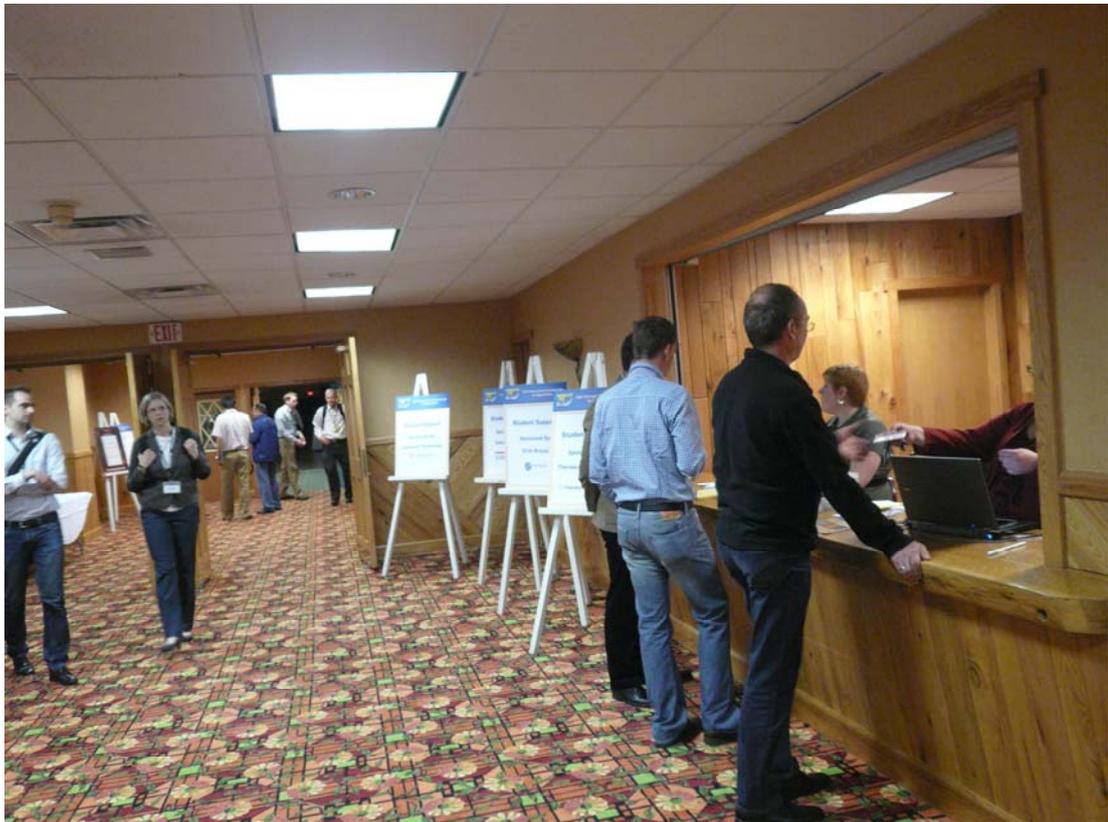
- 1、研討超合金單晶鑄造技術及其機械行為，以利於本計畫發展渦輪葉片成型技術之執行。
- 2、研討超合金之潛變及疲勞行為模式，以利於本計畫發展發展高性能渦輪轉子技術開發之執行。
- 3、研討超合金製程、合金設計、噴塗及鑄造技術發展，以利於本計畫發展高性能超合金材料及鑄件之執行。

貳、過程

國際超合金研討會(International Symposium on Superalloys)係由材料學會(The Minerals, Metals, Materials Society, TMS)主辦，美國金屬學會(American Society for Metals, ASM)協辦，是一個以學術研究與產業技術研發並重的研討會，並為一以超合金相關技術為核心之世界級會議，自1968年首次舉辦以來，每隔四年固定舉辦一次，至今已辦理至第12屆，會議地點均位於美國賓夕法尼亞州(Pennsylvania)香賓(Champion)七泉山莊(Seven Springs Mountain Resort)，圖一為大會會場外觀，會場雖簡單但與會人員相當熱烈，圖二為大會報到處，圖三為開幕演說盛況，時間雖已晚上八點，參與廠家及出席人數仍相當踴躍。研討會內容相當豐富，本次大會共分為超合金機械行為之機制及模式、單晶合金及其性能、超合金之潛變及疲勞、超合金製程及性質之模式、超合金及塗層之發展、葉輪用合金之行為模式，等六大主題，各主題間均安排50分鐘的交流討論，圖四為與會學者與各廠商交流討論實況，及許多之海報式報告(Poster)，如圖五。圖六為演講者精彩的演講情況。



圖一 大會會場—七泉山莊



圖二 大會報到



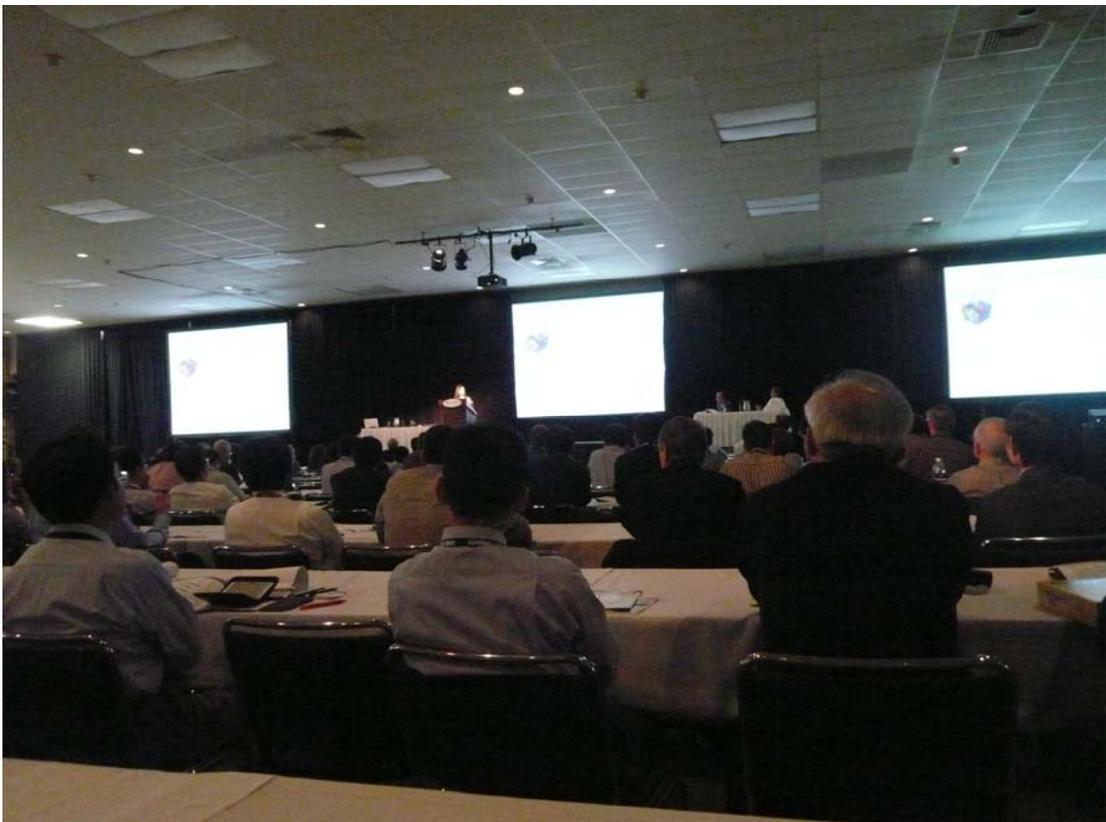
圖三 開幕演說



圖四 與會學者與各廠商交流討論實況



圖五 海報式報告(Poster)



圖六 演講者報告

每日工作日程如下：

日期	星期	行程		公差地點	工作項目
		出發	抵達		
101.09.08	六	桃園	洛杉磯		去程
101.09.09	日	洛杉磯	香賓		去程
101.09.10	一			美國 賓夕法尼亞州 香賓	研討超合金單晶鑄造技術及其機械行為，以利於本計畫發展渦輪葉片成型技術之執行。
101.09.11	二			美國 賓夕法尼亞州 香賓	研討超合金之潛變及疲勞行為模式，以利於本計畫發展發展高性能渦輪轉子技術開發之執行。
101.09.12	三			美國 賓夕法尼亞州 香賓	研討超合金製程、合金設計、噴塗及鑄造技術發展，以利於本計畫發展高性能超合金材料及鑄件之執行。
101.09.13	四	香賓			回程
101.09.14	五				回程
101.09.15	六		桃園		回程

叁、心得

一、概述

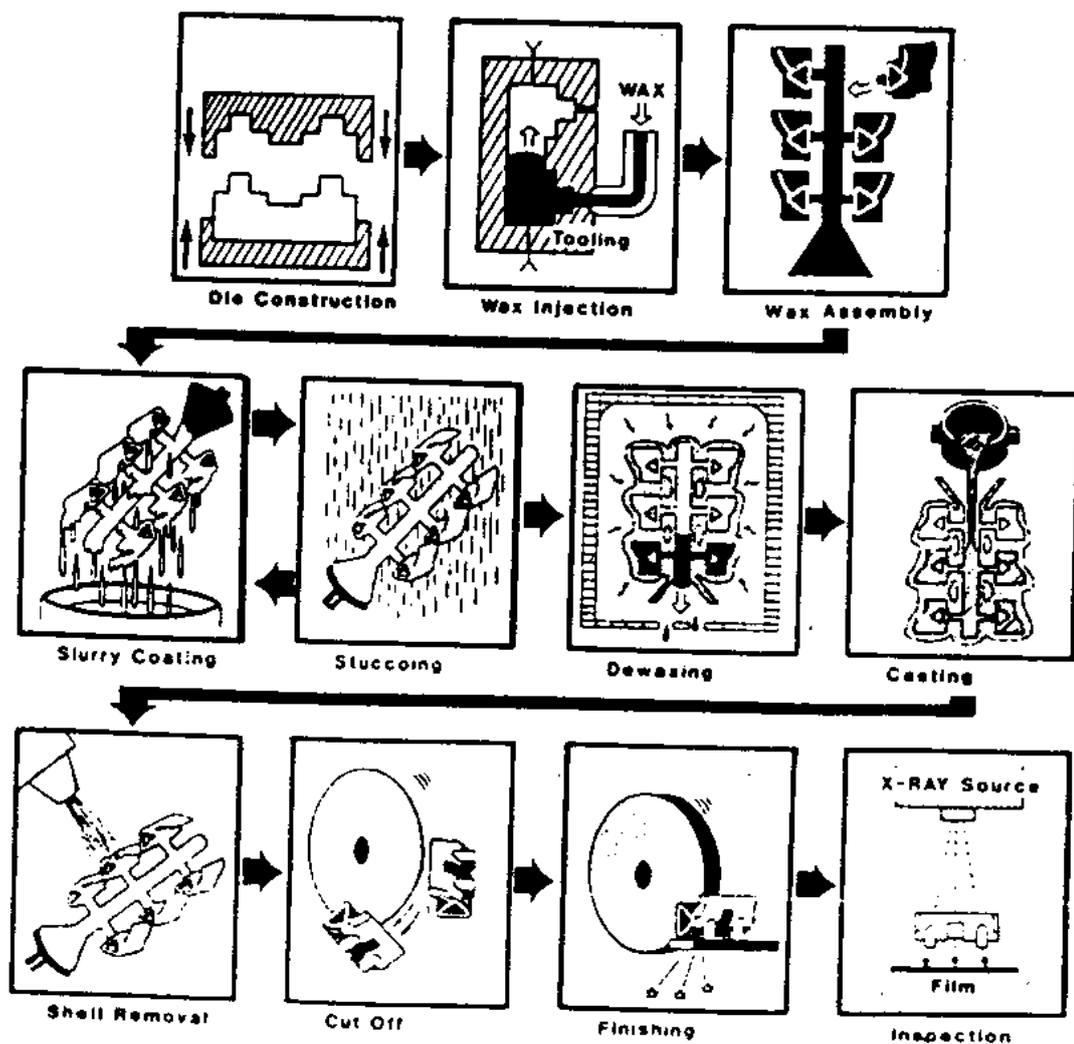
所謂的超合金是指被發展來使用於高溫的合金，超合金一般分為三大類：鎳基超合金、鈷基超合金及鐵基超合金，一般主要是以VIII族元素為主。除了鐵鈷鎳之外，尚含有鉻、鎢、鋁、鈦、鈮……等元素。在現代科技與經濟快速發展的情況下，與不同的高溫工程相關的高溫設備種類繁多，這些設備中的各種高溫零組件往往起著關鍵性的作用，所承受的溫度範圍寬廣，接觸的種類多樣，受力的大小和性質複雜多變，要求的使用壽命也不相同，超合金由於具有高溫強度及韌性(Toughness)佳、高溫應力破斷性能佳，具良好之高溫抗潛變性能、熱疲勞壽命長、耐高溫氧化及應力腐蝕等特性，因此，在核能、航空及國防工業武器系統等方面都佔有極重要的地位，因其需求特殊，世界各國均將其列為戰略物資，並將相關技術列為極機密，因此超合金材料技術發展之能量及成效往往可用來衡量一個國家國防工業發達與否之重要指標。

二、超合金單晶鑄造技術及其機械行為

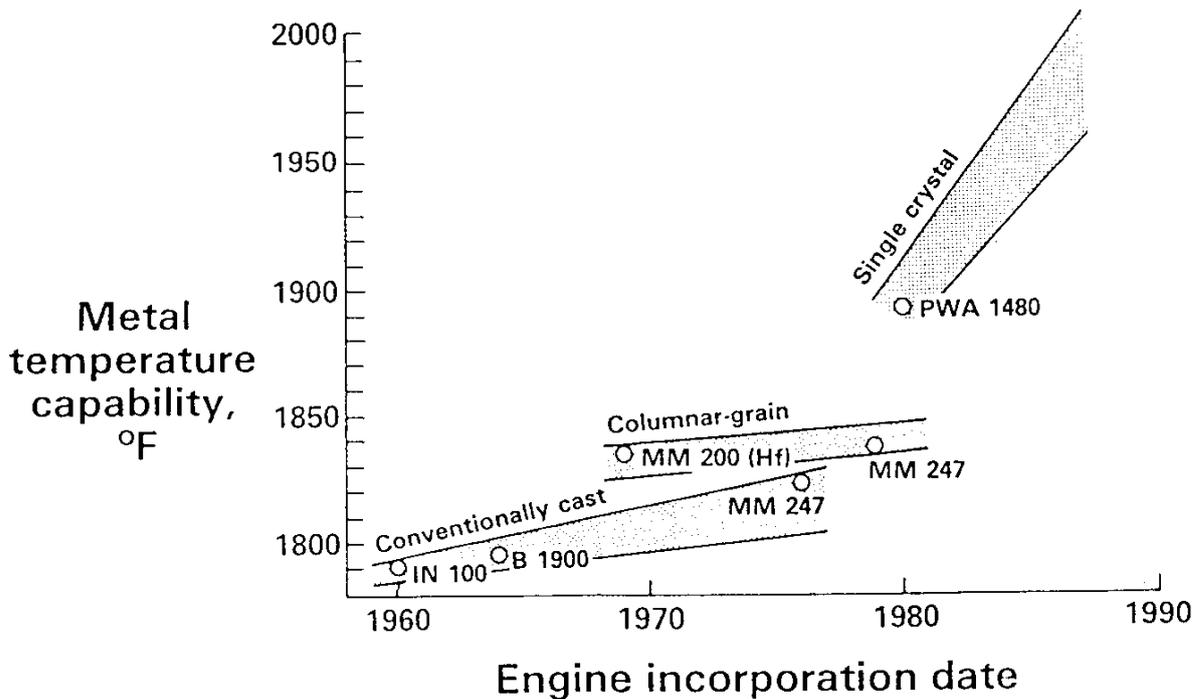
單晶超合金由於消除了晶界(Grain Boundary)，使晶界不再成為高溫使用時斷裂的起源，從而使高溫塑性及抗潛變壽命大大的提高，並可利用高溫固溶熱處理來細化 γ' 相組織，進而提高超合金的高溫強度，使單晶超合金具有最好的高溫性能，因此被大量使用在最先進的燃氣渦輪發動機葉片材料。一般單晶鑄造的製程方法很多，主要有：用發熱劑控制晶粒方向的發熱鑄型法、利用功率控制晶粒長大的功率降低法、利用可移動的水冷銅板和鑄型控制晶粒長大的快速凝固法及利用液態金屬冷卻，以控制導熱方式控制晶粒長大的液態金屬冷卻法等，其中目前應用最為廣泛的是快速凝固法，圖七為超合金精密鑄造製程。

早期單晶超合金的鑄造是藉由單方向凝固的製程，得到緊密的單方向晶及避免偏離的晶粒。而後之發展是藉由添加元素“Re”在樹枝晶核處偏析，造成較多Re元素之固溶量，而達到固溶強化效果，有效的提昇單晶超合金之固溶溫度。而在單晶鎳基超合金中添加0-0.15wt%的C可有效抑制合金中晶粒缺陷(freckle)的形成，也發現隨著C含量的增加，缺陷的量會顯著的減少。

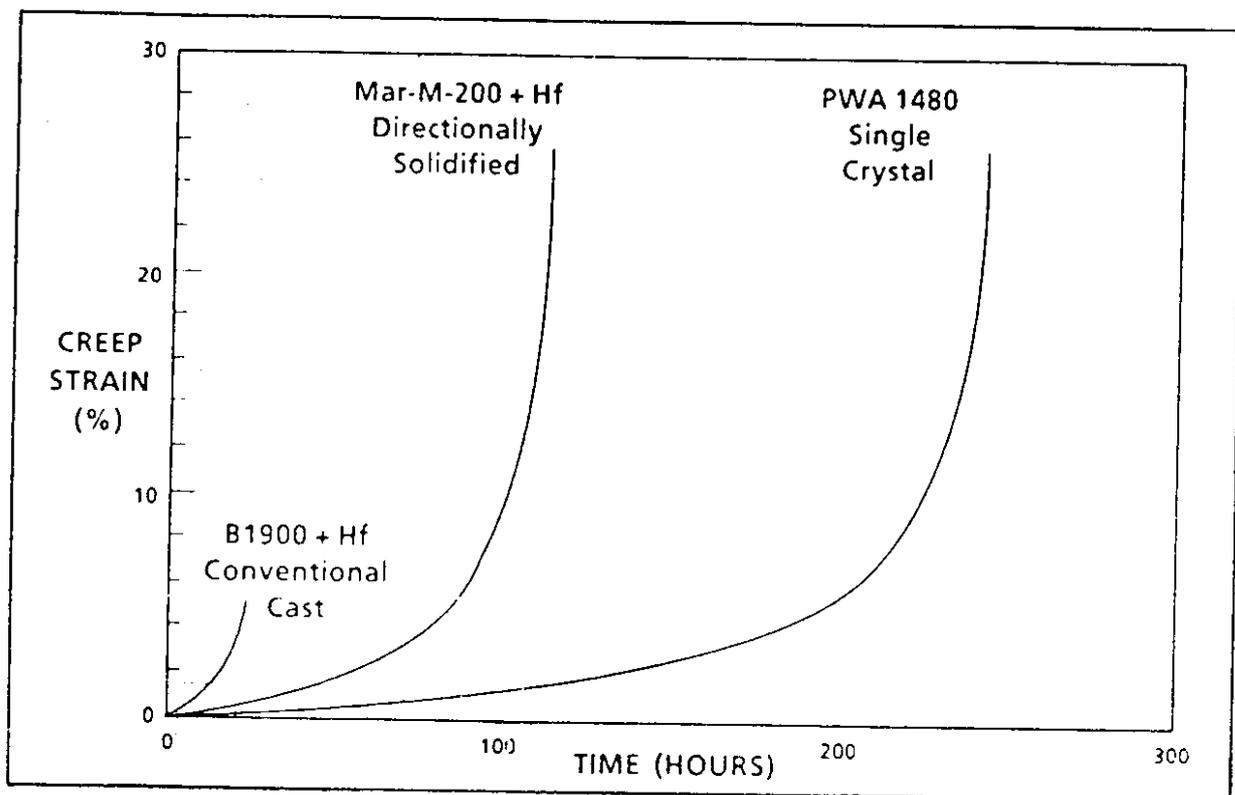
單晶超合金之不同於一般超合金是在於它為單一晶粒，沒有任何晶界存在，因此其主要的優點在於優越的高溫機械強度，於相同的應力條件下，其可使用的溫度已高達1100°C左右，較等軸晶超合金約提高了150°C，因而提升了渦輪引擎的操作溫度，也因此增加了飛機引擎的推力。等軸晶、柱狀晶與單晶超合金使用溫度比較如圖八所示。由於渦輪葉片使用於高溫下，其潛變強度亦為重要考慮因素；在相同的溫度條件下，單晶超合金潛變強度較一般超合金高出甚多，如圖九所示。另外，單晶超合金其抗熱疲勞(thermal fatigue resistance)及抗高溫腐蝕強度(hot corrosion resistance)均較一般超合金優越，如圖十所示；其抗熱疲勞強度的相對使用壽命高於等軸晶超合金九倍之多，而抗高溫腐蝕性則提高了四倍的使用時間，因而提高渦輪葉片使用壽命及減少飛機引擎維修的次數，圖十一為飛機引擎。



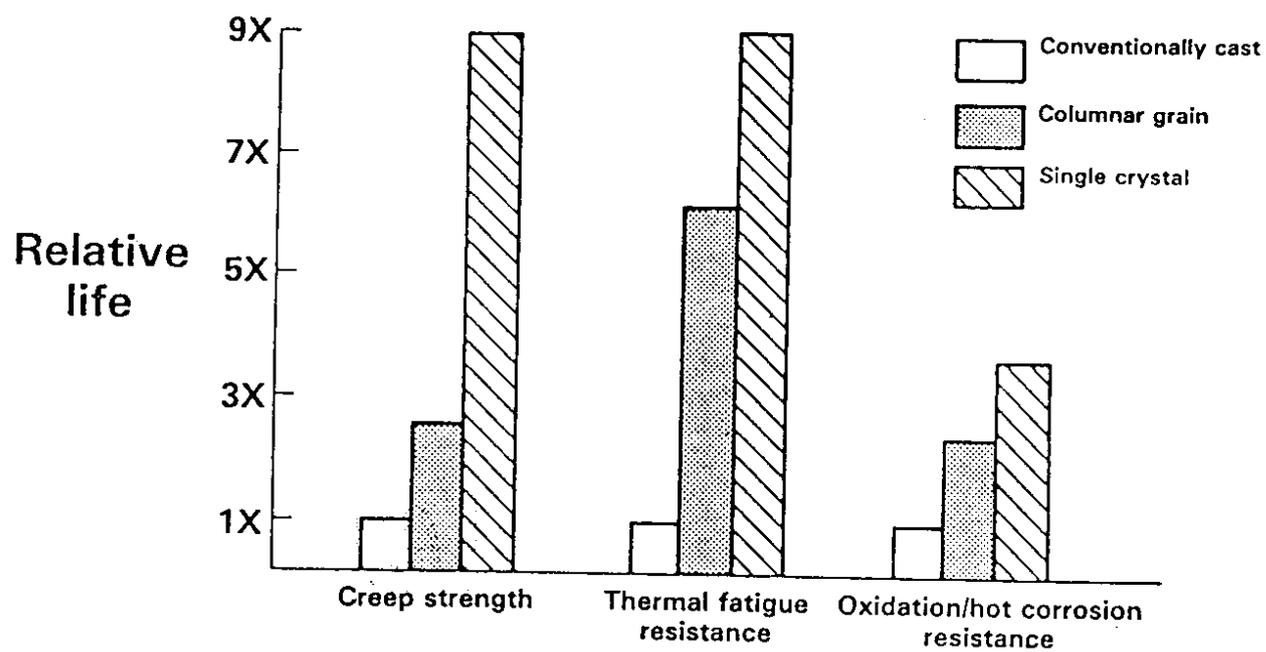
圖七 超合金精密鑄造製程



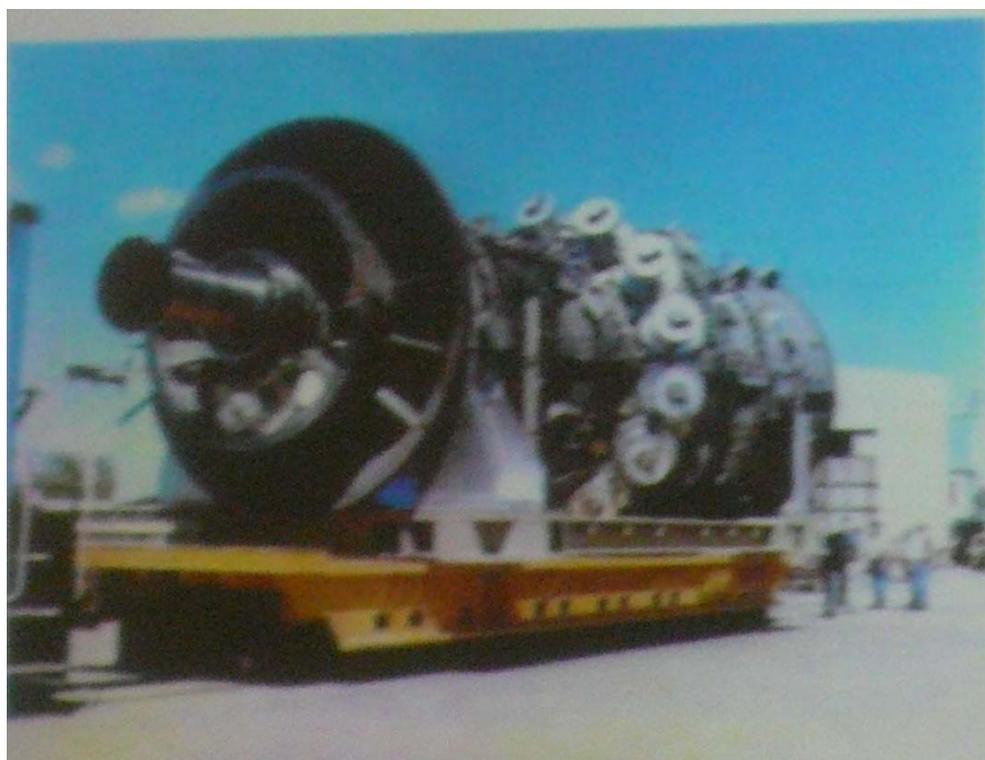
圖八 等軸晶、柱狀晶與單晶超合金使用溫度比較



圖九 等軸晶、柱狀晶與單晶超合金潛變強度比較



圖十 等軸晶、柱狀晶與單晶超合金潛變強度、抗熱疲勞強度及抗高溫腐蝕性比較



圖十一 飛機引擎

三、超合金之潛變及疲勞行為模式

潛變，是指合金材料在一定溫度和應力的長時間作用下，隨著時間的延長，材料會緩慢地發生塑性變形，直到斷裂。潛變時產生的塑性變形稱為"潛變變形"，使材料產生潛變的應力可以遠小於材料的降服點。原則上，在高溫下，材料所受應力和破斷之間都與時間相關，即潛變過程是與時間相關的過程。潛變在較低溫度下也會發生，但只有達到一定的溫度時，潛變才會變得顯著，通常稱這一溫度為潛變溫度。一般來說鐵基超合金潛變溫度在 540°C 以上，鎳基和鈷基超合金其潛變溫度大於 650°C。

合金潛變初期是差排運動，使差排或析出粒子所產生的阻力被逐漸克服，其速率控制步驟包括擴散到允許刃差排的爬升，或者螺旋差排產生橫向滑移。合金材料在高溫低應力下，另一個重要潛變過程是晶界滑動。抗滑動能力取決於晶界差排的可移動性和晶界上析出粒子的存在與否。這種晶界滑動導致晶界連接處應力集中，此處對於裂紋形成是重要的。這種應力集中可由在材料基體內潛變和應力鬆弛或由晶界滑移來消除。

一些研究指出，在一定溫度和時間下，潛變回復應變隨應力呈線性增大；潛變恢復速率隨溫度增高而增大；當應力足夠低時，實際上所有瞬態潛變與應力呈線性關係，並且是可回復的；數學上，回復可由虎克定理和大範圍的鬆弛時間聯合來描述。

高溫熱段組件在使用中常常經受熱變化的作用，這種因熱變化所造成的材料疲勞現象稱為"熱應力疲勞"或"熱疲勞"。這個過程是由於在組件中陡峭的溫度梯度引起的。可能產生熱疲勞的零件很多，如燃氣輪機空氣加熱器和熱交換器管子，使用時內表面溫度急劇上升，外表面溫度則較低，沿壁厚方向存在一個瞬間陡峭的溫度梯度，內表面因熱膨脹受到次外層溫度較低區約束，產生壓應力和應變；反之，當冷卻時，內表面又迅速降溫，其收縮卻受到後來溫度升高的次外層的約束而產生拉應力和應變。如此經過幾千次循環，內表面即產生熱疲勞裂紋，這種裂紋呈龜裂狀。其他如葉片等也會產生熱疲勞裂紋。

影響高溫疲勞的因素計有以下 5 點：

- a. 材料：材料疲勞極限與強度極限之間存在著一定的關係，但在不同組織的狀態下，這種關係可在很寬的範圍內變動，故材料的疲勞比不可互相換算，需由實驗來確定。
- b. 溫度：一般來說，溫度愈高，疲勞極限有降低的趨勢，愈接近熔點，這種趨勢愈明顯，但最新之研究有將材料施以時效硬化或應變硬化等處理，反而使得材料在高溫時疲勞

極限較低溫時為高。

- c. 頻率：高溫疲勞的頻率效應顯著，這主要是潛變作用的影響，頻率的改變，疲勞裂縫的特徵也不同；頻率高時呈穿晶裂縫，頻率低時為延晶裂縫，中間時則呈現混合型裂縫。
- d. 應力集中：在高溫下，缺口產生的應力集中大多數情況下會導致疲勞極限的降低。缺口越尖銳，應力集中越嚴重，疲勞極限降低越多。
- e. 表面狀況：一般來說，疲勞極限會隨著表面粗糙度的增加而減少。

四、超合金製程技術

依其超合金所需之成份熔煉及精煉完成後，為作成可用之產品，故需再經由加工處理，但超合金其質硬、韌，以傳統之機械加工並不容易，故常以熱作加工。熱作加工溫度，以合金的初融點為上限，而以避免重新析出具脆性的金屬間析出相溫度為下限，若再考量應變硬化(Strain Hardening)情形，則必須以再結晶溫度為其下限。超合金熱作加工時，必須注意把握以下幾個原則：

- a. 加熱速率要慢，以免因熱應力引起的龜裂。
- b. 工件由加熱爐中取出轉往加工速率要快，以減少其降溫。
- c. 避免工件被模具所激冷，應儘量減少工件與模具間的接觸時間，或將模具加熱。
- d. 避免過度的絕熱加熱(Adiabatic Heating)，防止工件局部因過熱而產生晶粒異常的成長。
- e. 工件加工處理要恰當，應避免在最大張力方向的平面上留有因打磨而生的深痕。
- f. 每次加熱後的加工量要有限制。
- g. 要防止被有害的微量元素所污染。
- h. 要避免曝露在含硫的大氣下。

在完成零組件製作後，為提高其性能，常需再經由熱處理加工，熱處理加工有各式各樣的目的，大致歸類可列入下面五項：

- a. 消除材料經鑄造、鍛造，加工焊接與過程，在材料內部區成形成之殘留應力。
- b. 消除材料鑄造後之偏析件用，所造成之成份的不均勻。
- c. 軟化材料，以利其可塑性、加工性。
- d. 增加材料強度、硬度、韌性、延展性與機械性質。
- e. 各種表面熱處理，可增加材料表面硬度、耐磨性、耐蝕性、疲勞抵抗力，以及保持物品形狀、尺寸之穩定，避免變形。

表一為常用超合金熱處理條件

表一 常用超合金熱處理條件

合金名稱	熱處理條件	基體
16-25-6	1170°C 10min 水冷→溫間加工(約700°C)後→650°C 2hr 以上空冷	鐵基
N-155	1200°C 1hr 水冷→750°C 16hr 水冷	鐵基
JIS SUH 661	1130~1200°C 急冷→780~830°C 空冷	鐵基
Discaloy	1000°C 1hr 油冷→718°C 5hr→649°C 30hr 空冷	鐵基
A-286	982°C 1hr 油冷→718°C 1hr 空冷	鐵基
Incoloy 901	1093°C 1hr 水冷→800°C 4hr→730°C 24hr 空冷	鐵基
Refactaloy 26	1024°C 1hr 油冷→816°C 20hr→732°C 20hr 空冷	鐵基
JIS NCF 3	(s ₁)980°C 空冷→730°C 8hr→615°C 徐冷時效10hr (s ₂)1140°C 空冷→730°C 8hr 空冷→700°C 20hr 空冷	鎳基
Inconel X-750	1138°C 3hr 空冷→843°C 34hr→704°C 20hr 空冷	鎳基
M252	1066°C 4hr 油冷→760°C 15hr 空冷	鎳基
Udimet 500	1080°C 5hr 空冷→843°C 24hr→760°C 16hr 空冷	鎳基
Udimet 700	1170°C 4hr 空冷→1080°C 4hr 空冷→843°C 24hr 空冷→760°C 16hr 空冷	鎳基
L605	1232°C 10min~1hr 空冷	鈷基

S816	1177°C 1hr 水冷 760°C 12hr 空冷	鈷基
------	--------------------------------	----

五、超合金合金設計

5.1、鐵基超合金

鐵基超合金主要成份為鐵，含有一定量的鉻和鎳等元素，通常鎳含量大約為 25%~55%，鎳+鐵>65%為基底，且含有少量的鉬和鎢，它是中等溫度（600~800 °C）條件下使用的重要材料，具有較好的中溫力學性能和良好的熱加工塑性，合金成分比較簡單，成本較低。其強化方式為碳化物或金屬間化合物析出硬化或固溶強化；各種元素的加入提高合金的性能，例如加入 Ni、Al、Ti、Nb 等元素，也可加入相對大量的碳(約 0.5%)以形成碳化物沉澱來強化，有時也加入氮和磷以增加強化作用。碳也促進形成晶界碳化物相，以促進晶界強化作用，其他像鉬或鎢這類固溶強化元素也應少量的加入。

鉻主要提供鐵基超合金的抗氧化性，Ni 和 Mn 也可改進合金的抗氧化性，加入少量的 B 可大幅改善其高溫性能，鐵基超合金是具有面心立方格子(face centered cubic, fcc)的合金，因為密排晶格對於與時間相關的變形過程有較好的抵抗力。

鐵基超合金按成份和強化機制可分為以下 4 個模組：

1. 含 25~35%Ni， γ' 相富 Ti，注意避免過高的 Ti-Al 比，以免 fcc γ' 相被 hcp η 相(Ni₃Ti) 代替，降低強化效果，如 V-57、A286 合金。
2. 含 Ni 至少 40%，含固溶強化和析出相形成元素較多，如 Pyomet 860、Incoloy 901 合金。
3. Fe-Ni-Cr-Co 系統，無析出硬化或者甚少，該組合金顯示出優異的抗高溫腐蝕能力，如 N-155、Haynes 556 合金。
4. Fe-Ni-Co 系統，由 fcc γ' 相強化，具有低膨脹係數和高溫強度(650°C 以下)，該組合金不含 Cr，容易氧化，合金中有少量的 Ti 形成 γ' 相， η 相也可能形成，如 Incoloy 903、907、909 合金。

表二為主要鐵基超合金之成份

表二 鐵基超合金化學之成份(wt%)

合金名稱	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	B	其他
16-25-6	0.08	1.35	0.7	16	25	—	6.0	—	—	—	—	Bal	—	N0.15
N-155	0.15	1.5	0.5	21	20	20	3.0	2.5	1.0	—	—	Bal	—	N0.15
19-9DL	0.30	1.1	0.6	19	9	—	1.25	1.2	0.4	0.3	—	Bal	—	—
Discaloy	0.04	0.9	0.8	13.5	26	—	2.75	—	—	1.75	0.10	Bal	—	—
A286	0.05	1.4	0.4	15	26	—	1.25	—	—	2.15	0.2	Bal	0.003	V0.03
Incoloy 26	0.05	0.45	0.4	13.5	42.7	—	6.2	—	—	2.5	0.25	34.0	—	Cu0.10
Refractaloy 26	0.03	0.8	1.0	18	38	20	3.2	—	—	2.6	0.2	Bal	—	—
JIS SUH 661	0.12	1.5	0.8	21	20	20	3	2.5	—	—	—	Bal	—	N0.15

5.2、鎳基超合金

鎳基超合金是以鎳為基體（含量一般大於 50%），在 650~1000 範圍內具有較高的強度和良好的抗氧化、抗高溫腐蝕能力的超合金材料。鎳基超合金是所有超合金中應用最廣、高溫強度最高也是最重要的一種合金。其主要原因，一是鎳基合金中可以溶解較多合金元素，且能保持組織的穩定性；二是可以形成共價有序的 AB 型金屬間化合物 γ [Ni(Al, Ti)] 相作為強化相，使合金得到有效的強化，獲得比鐵基超合金和鈷基超合金更高的高溫強度；三是含鉻的鎳基超合金具有比鐵基超合金更好的抗氧化和抗燃氣高溫腐蝕能力。通常鎳基超合金中含有十多種元素，其中含 Cr 主要的功用是抗氧化和抗腐蝕，其他元素主要則是強化作用。根據它們的強化作用方式可分為：固溶強化元素，如鎢、鉬、鈷、鉻和鈳等；析出硬化元素，如鋁、鈦、鈮和鉭；晶界強化元素，如硼、鋯、鎂和稀土元素等。

鎳基超合金按強化方式有固溶強化型(Solid-Solution-Strengthened)、析出硬化型(Precipitation Strengthened)和氧化物分散強化型(Oxide-dispersion- Strengthened)三大類。在 650°C 以上，析出硬化型的鎳基超合金強度遠大於固溶強化型的鎳基超合金，而氧化物分散強化型在 1200°C 以上的高溫成為強度最佳的材料，但在中間溫度(650~1200°C)其強度並非最佳。對於這三種超合金而言，析出硬化型是最重要的，這類型的超合金是藉著 γ' [Ni₃(Al, Ti)] 在母相(Matrix) γ 中的析出，而達到高溫強化的效果。

此外，鎳基超合金通常用做航空器、火箭發動機、核反應爐、石油化工和能源轉換設備等的高溫熱段零組件。在飛機發動機及發電廠燃氣渦輪機中，渦輪葉片幾乎全部採用鎳基超合金製作。

表三為主要鎳基超合金之成份

表三 鎳基超合金化學之成份(wt%)

合金名稱	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	B	其他
Hastelloy X	0.10	0.5	0.5	22	Bal	1.5	9	0.6	—	—	—	18.5	—	—
JIS NCF 3	0.05	0.7	0.5	16	>70	—	—	—	Ni+Ta1.0	2.5	0.7	7	—	—
Inconel X-750	0.04	0.7	0.3	15.0	73	—	—	—	0.85	2.5	0.8	6.75	—	Cu0.05
Rene' 41	0.09	—	—	19	Bal	11	10	—	—	3.1	1.5	—	0.01	—
M252	0.15	0.5	0.5	19	Bal	10	10	—	—	2.6	1.0	—	0.005	—
Udimet 500	0.08	0.75	0.15	19	Bal	19.5	4	—	—	2.9	2.9	4	0.01	—
Udimet 700	0.15	—	—	15	Bal	18.5	5.2	—	—	3.5	4.2	1.0	0.05	—
Inconel 713C	0.12	—	—	12.5	Bal	—	4.2	—	2.0	0.8	6.1	—	0.012	Zr0.10
Nimonic 115	0.2	—	—	15	Bal	15	3.5	—	—	4	5	—	—	—

5.3、鈷基超合金

鈷基超合金是以鈷作為主要成分，含有相當數量的鎳、鉻、鎢和較少量的鉬、鈮、鉭、鈦、鏷，有時還含有鐵的一類合金。與鐵基及鎳基超合金不同，它不是由與基體牢固結合的有序析出相來強化，而是由已被固溶強化的沃斯田鐵 fcc 相和基材中分布少量碳化物組成。鑄造鈷基超合金在很大程度上依靠碳化物來強化。純鈷晶體在 417°C 以下是六方密格子 (hexagon close packed, hcp) 晶體結構，在更高溫度下轉變為 fcc。為了避免鈷基超合金在使用時發生這種轉變，實際上所有鈷基合金由鎳合金化，以便在室溫到熔點溫度範圍內使組織穩定化。

鈷基超合金比鎳基超合金的銲接性能和抗熱疲勞性能更好。它的另一個優點是它可以在空氣或氬氣中熔煉，與此相反，由於鎳基和鐵基超合金含有活性金屬元素 Al 和 Ti，故需以真空熔煉。但是，鈷基超合金不像鎳基超合金那樣在固溶體中對合金化元素有很高的溶解度，所以，該類合金更易析出所不希望的板狀 σ 、Laves 和類似的 TCP 相。

表四為主要鈷基超合金之成份

表四 鈷基超合金化學之成份(wt%)

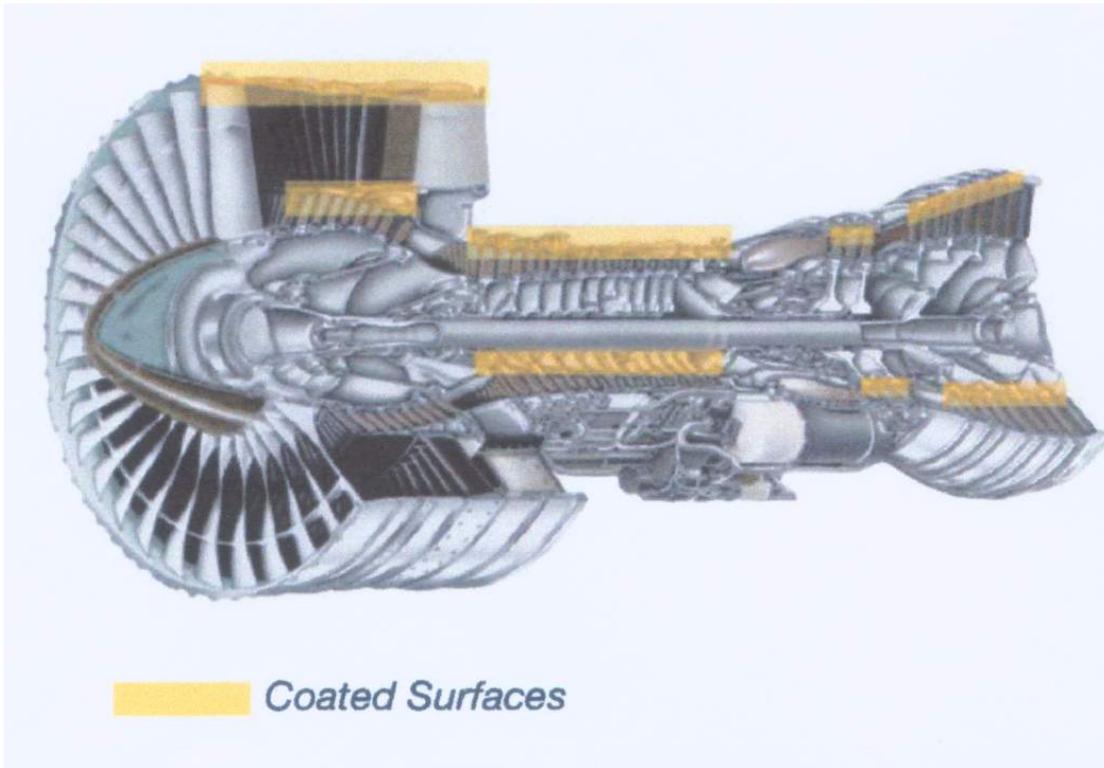
合金名稱	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Fe
L605	0.1	1.5	0.5	20	10	Bal		1.5		
S816	0.38	1.2	0.4	20	20	Bal	4.0	4.0	4.0	4

七、超合金噴塗

為進一步提升超合金之耐熱性，以提高操作溫度，故常於工件上再進行氧化鋯絕熱塗層噴塗，所謂絕熱塗層乃是指在原金屬合金上被覆一種高絕熱性的材料，藉以降低金屬母材溫度，提高工作效率。絕熱塗層主要由氧化鋯添加 CaO、MgO、Y₂O₃ 等各種安定劑所組成，安定劑的添加主要是防止氧化鋯在高溫下的可逆相變。電漿噴覆氧化鋯絕熱塗層主要應用於高溫零組件，如渦輪引擎之噴嘴、燃燒室、渦輪發電機葉片等，圖十二為噴塗 NiCrAlY 合金之發電機葉片；圖十三則顯示渦輪噴射引擎一般需進行噴塗製作之部位。

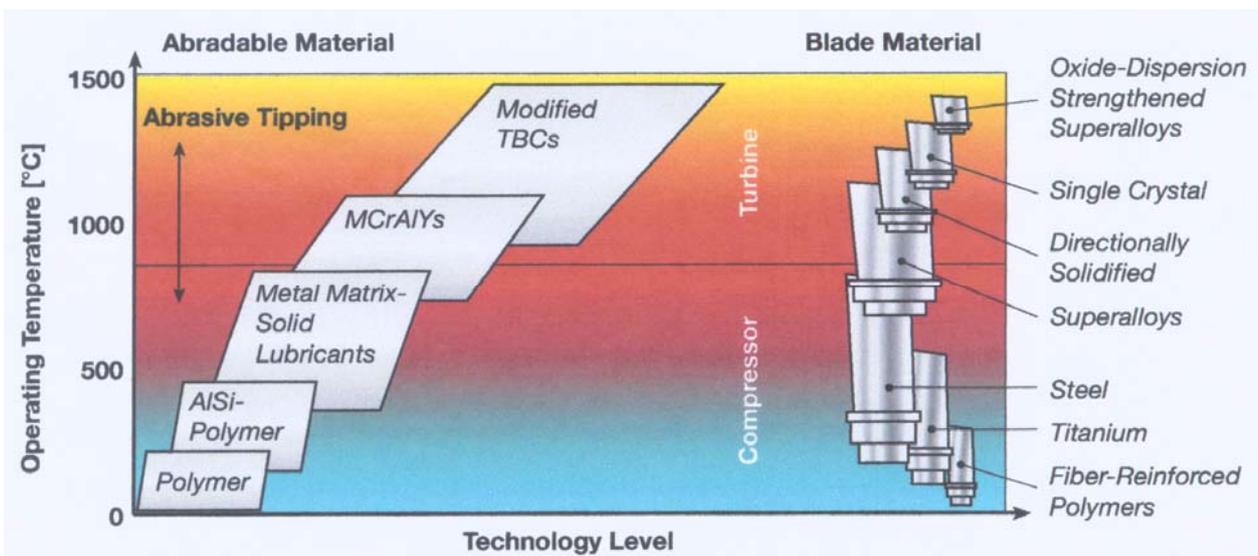


圖十二 發電機葉片—一級動葉



圖十三 渦輪噴射引擎需進行噴塗之部位

圖十四顯示了各種不同操作溫度所建議選用之材料及塗層，由圖中可知，進行絕熱塗層製作之母材操作溫度可近 1500°C，較以氧化物分散強化之超合金操作溫度略高，且技術層次較為低，較具經濟價值。



圖十四 不同操作溫度選用之材料及塗層

八、葉輪用合金之行爲模式

葉輪爲燃氣渦輪機中之最重要之高溫組件，又可分爲靜葉片及動葉片，依照渦輪機大小及輸出功率之不同，設計爲不同之級數，大型之火力發電廠所使用之燃氣渦輪機甚至可高達10級，靜葉片及動葉片功用分述如下：

靜葉片：又稱爲導向葉片，用來調整燃燒室噴射出來的高溫火焰的方向並使其加速。靜葉片直接接觸高溫火焰，火焰的沖刷作用也很強，所處的環境最惡劣，也必須用空氣冷卻。

動葉片：這是整個燃氣輪機最關鍵的部分，比靜葉片小很多。儘管所受的溫度比靜葉片低，但處於高速旋轉的狀態，因此必須能承受很高的離心力作用。

影響葉輪用合金材料劣化的機構大體上可分爲二類，(1)與機械性質有關的劣化，如潛變、疲勞、熱疲勞及其交互作用；(2)與腐蝕有關的劣化，包括高溫及低溫熱腐蝕。一般而言，如果機組燃油非常乾淨則受到腐蝕的影響較小，反而在運轉中所受到的週期應力(Cyclic Stress)較大，而且基載(Based-loaded)的機組第一級動葉片以受到潛變的影響爲主，備載(Peaking-loaded)的機組第一級動葉片則以受到熱疲勞(Thermal Fatigue)爲主。

關於葉輪用合金材料與機械性質有關的劣化已於前段超合金之潛變及疲勞行爲模式述明，在此不再贅述，與腐蝕有關的劣化則敘述如下：

熱腐蝕可分爲Type1之高溫熱腐蝕(High Temperature Hot Corrosion, HTHC)其發生溫度約在800°C~1000°C爲熔融鹽 Na_2SO_4 附著在金屬表面上。Type2爲低溫熱腐蝕(Low Temperature Hot Corrosion, LTHC)其發生之溫度範圍約在600~750°C是屬低熔點的 Na_2SO_4 - CoSO_4 共晶熔融鹽腐蝕，其共晶溫度爲545°C。Type1熱腐蝕在1960年初的文獻中就被提出，其特徵就是在金屬表面不規則結垢間分佈著顆粒狀的硫化物，熔融鹽 Na_2SO_4 中之S擴散進入合金中增加熔融氧化物之活性，並藉著鹼溶劑(Basic Fluxing)模式去除合金表面之保護性氧化物 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 。Type2熱腐蝕是在1975年美國海軍的氣渦輪機的動葉片在600~700°C間運轉時受到嚴重的劣化，學者專家才開始注意到 Na_2SO_4 嚴重的腐蝕行爲可能會發生在較低溫度處，此乃因低溫下會形成低熔點的共晶硫酸鹽如 Na_2SO_4 - CoSO_4 ，此種低溫熱腐蝕行爲與傳統在高溫下觀察到的腐蝕行態明顯不同，沒有均勻的硫化造成的孔蝕，也無乏鉻和乏鋁區，其特徵就是在金屬基材與表面結垢間有甚多的層狀氧化物且無硫化物出現。

九、各國發展重點

本次大會並未提供與會人員資料，與會人員之相關背景資料無法確實統計，但由職觀察發現與會人員90%以上為大學教授及研究生，約10%為各研究機構及各煉鋼廠研發部人員。各研究機構與廠商通常又與各大學合作開發，至於各國投入資源狀況因超合金主要是應用於國防武器研發，各國均列為機密資料，無法查得。目前超合金之發展以CMSX-4合金最受重視，美國、日本、英國、瑞典、法國、德國及中國大陸皆已投入相關研究，其中又以日本的國家材料科學研究所(National Institute for Materials science)之發展最為領先；IN718合金則有美國、法國、英國及澳洲等國家投入，此種合金則以美國之技術能力最為超前，其他諸如IN100、IN738、LSHR、MC2、ME3及TMW-4M3等超合金亦有日本、美國、英國、法國等國家持續發展，但因技術較為成熟，相關之研究相對較少。大體上而言，鎳基超合金仍為各國發展之重點項目，鐵基超合金次之，而鈷基超合金則因為價格較為昂貴，於本次大會中並未受到重視。

肆、建議事項

職赴美參加2012年第12屆國際超合金研討會依所獲之心得有幾點值得院內作為未來精進之目標：

1. 超合金在核能、航空及國防工業武器系統等方面都佔有極重要的地位，因其需求特殊，世界各國均將其列為戰略物資，並將相關技術列為管制機密，本院為國內少數具發展合金設計及相關製程技術能量之單位，可著力發展新型超合金及其衍生技術，以厚植國力。
2. 高溫超合金主要應於渦輪引擎熱段零組件，本院具有完整的超合金熔煉及精煉能力，同時具有電漿噴塗表面改質能量，初期可推廣應用於燃氣渦輪機葉片開發，提高國內重工業技術水準。
3. 超合金特殊成型技術已備受重視，葉輪成型已成為關鍵性技術，可配合現有之精密鑄造技術持續發展此一技術。

附件：2012 年超合金研討會議程表

- (日) 09/09/2012 下午 08:00 大會開幕及演說
- (一) 09/10/2012 上午 08:30 超合金機械行爲之機制及模式 I
- (一) 09/10/2012 上午 10:10 交流研討 A：超合金機械行爲之機制及模式
- (一) 09/10/2012 上午 11:20 超合金機械行爲之機制及模式 II
- (一) 09/10/2012 下午 06:30 單晶合金及其性能 I
- (一) 09/10/2012 下午 07:45 交流研討 B：單晶合金及其性能
- (一) 09/10/2012 下午 08:45 單晶合金及其性能 II
- (二) 09/11/2012 上午 08:30 超合金之潛變及疲勞 I
- (二) 09/11/2012 上午 10:10 交流研討 C：超合金之潛變及疲勞
- (二) 09/11/2012 上午 11:20 超合金之潛變及疲勞 II
- (三) 09/12/2012 上午 08:30 超合金製程及性質之模式 I
- (三) 09/12/2012 上午 10:10 交流研討 D：超合金製程及性質之模式
- (三) 09/12/2012 上午 11:20 超合金製程及性質之模式 II
- (三) 09/12/2012 下午 06:30 超合金及塗層之發展 I
- (三) 09/12/2012 下午 07:45 交流研討 E：超合金及塗層之發展
- (三) 09/12/2012 下午 08:45 合金及鑄造之發展 II
- (四) 09/13/2012 上午 08:30 葉輪用合金之行爲模式 I
- (四) 09/13/2012 上午 10:30 葉輪用合金之行爲模式 II