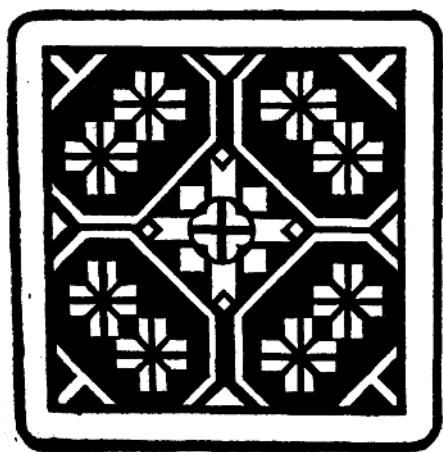


台港及海外中文报刊资料专辑

材料科技



第 3 辑

书目文献出版社

出版说明

由于我国“四化”建设和祖国统一事业的发展,广大科学研究人员,文化、教育工作者以及党、政有关领导机关,需要更多地了解台湾省、港澳地区的现状和学术动态。为此,本中心编辑《台港及海外中文报刊资料专辑》,委托书目文献出版社出版。

本专辑所收的资料,系按专题选编,照原报刊版面影印。对原报刊文章的内容和词句,一般不作改动(如有改动,当予注明),仅于每期编有目次,俾读者开卷即可明了本期所收的文章,以资查阅;必要时附“编后记”,对有关问题作必要的说明。

选材以是否具有学术研究和资料情报价值为标准。对于反对我四项基本原则,对我国内情况进行捏造、歪曲或对我领导人进行人身攻击性的文章,以及渲染淫秽行为的文艺作品,概不收录。但由于社会制度和意识形态不同,有些作者所持的立场、观点、见解不免与我们迥异,甚至对立,或者出现某些带有诬蔑性的词句等等,对此,我们不急于置评,相信读者会予注意,能够鉴别。至于一些文中所言一九四九年以后之“我国”、“中华民国”、“中央”之类的文字,一望可知是指台湾省、国民党中央而言,不再一一注明,敬希读者阅读时注意。

为了统一装订规格,本专辑一律采取竖排版形式装订,对横排版亦按此形式处理,即封面倒装。

本专辑的编印,旨在为研究工作提供参考,限于内部发行。请各订阅单位和个人妥善保管,慎勿丢失。

北京图书馆文献信息中心

材料科技 (3)

——台港及海外中文报刊资料专辑(1987)

北京图书馆文献信息中心编辑

季啸风 李文博主编

高彦华 选编

书目文献出版社出版

(北京市文津街七号)

北京百善印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

787×1092毫米 1/16开本 5印张 128千字

1987年12月北京第1版 1987年12月北京第1次印刷

印数 1—3,000册

ISBN 7-5013-0297-9/TB·3

(书号 15201·74) 定价 1.40元

[内部发行]

超合金的發展現況

中山科學研究院副研究員 程人俠

摘 要

超合金 (superalloys) 是用於氣渦輪 (gas turbine) 高溫部份的結構材料，有鎳基超合金、鈷基超合金、和鐵基超合金三大類。氣渦輪對材料性能的要求極為嚴格，超合金在過去四十多年的發展歷史中經過多次的改良突破，迄今已達登峰造極之境。本文旨在介紹超合金在氣渦輪中的應用、超合金的製造過程、新技術的發展、美國和其他各國的超合金工業、最後談到本省超合金的研究發展工作。

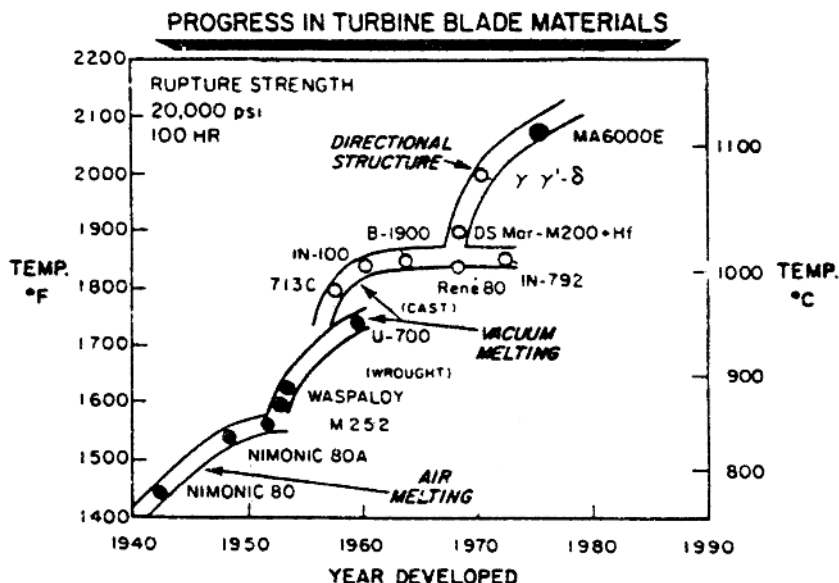
導 論

英人惠特爾 (Frank Whittle) 發展成功噴射引擎⁽⁶⁾，導致一九四一年五月世界第一架噴氣機飛行成功。由於噴射引擎（或稱氣渦輪）操作溫度越高，熱效率也越高，因此高溫材料的需要也就十分殷切。這類高溫材料稱為超合金，它們於一九四一年開始出現，最早的超合金名 Nimonic 75，係由英國維根公司 (Wiggin Co.) 製造，以 80 Ni / 20 Cr 電阻超合金為基礎改良而成。隨後又發展了 Nimonic 80，採用於惠特爾 W2B 引擎，作為葉片材料，成效良好。在此同一時期，美國的國際鎳業公司也發展了 Inconel 合金（基本成份：77 % Ni, 16 % Cr, 和 7 % Fe 及少量鐵及鋁，能作時效硬化），例如 Inconel W（現更名為 Inconel alloy 722）及 Inconel X（現名 Inconel alloy X-750）。

英國在 1944 年將 Nimonic 80 的含鋁量提高而成 Nimonic 80 A，次年出現 Nimonic 90。再將其中鈦及鋁含量提高使溫度能力增加，定名 Nimonic 95。在 1954 在此合金中添加 Mo 作固溶體強化，同時降低 Cr 含量至 10-12

%，使其性能加以改進而得到Nimonic100。但因Cr含量降低，致合金對硫化物及海中塩份之腐蝕抵抗力轉弱，至1957年遂有提高Cr含量的Nimonic105。該合金易於鍛造，廣泛應用於英國出品各種引擎中。此後又推出Nimonic108和109，其中鈦和鋁略有增加，造成多量 γ' 析出物，使壽命和溫度能力有所改善。至1960年Nimonic115出現，溫度能力又有提升，鍛造溫度已接近固溶線(solidus)，鍛造技術益形困難。1971年Nimonic120問世，至此熱性鎳基合金葉片材料已達登峯造極之境⁽⁶⁾。

在鎳基合金方面作葉片用的鎳基合金有Nimocast713和NimocastPK 24（在美國稱IN100）。早期鎳基合金的鑄件多是熱性合金成份的翻版。Nimonic713有一種低碳（LC）姊妹合金是為鑄造葉片與葉輪整合為一的鑄件而設計，因葉片部份要求高溫強度，而葉輪部份需要低溫降伏強度。由於Nimocast alloy 80和90不易造出無缺陷產品，遂有Nimocast PE10（國際鎳業公司編號MC102）的發展，不含鈦和鋁，時在1960年。勞斯萊斯公司早在1955年曾發展一種大氣熔煉的合金，可用於靜態組件，名為Nimocast 242。



圖一 超合金在過去四十年中溫度能力的進展

在美國超合金的發展也是遵循同一路線。最早在1939年便已發展了鎳鉻鐵合金，以後據此而發展了一系列Inconel合金。在鈷基合金方面，1942年發展了鎳性的Vitalium，此後改良為Haynes alloy 21。四十年代中尚發展了HA-21和X-30 1957年出現W1-52，1953年奇異公司發成功X-45，馬丁金

屬公司在1964年推出Mar-M509，奇異在1968年推出FSX-414。熱性鈷基合金有S-816和L-605，卡波特公司(Cabot Corp.)則於1966年發展了Haynes alloy 188。在鎳基合金方面，四十年代有Waspaloy和M-252，可鍛成葉片應用。Waspaloy後來也發展成葉輪材料。Udimet 500和Udimet 700 可以用精

密鑄造法製造葉片，也可以用鍛造法製造葉輪，不過二種產品的熱處理過程却有所不同⁽⁶⁾，方能滿足不同的機械性能要求。Incoloy alloy 901 和 Astroloy 也是優良的葉輪材料，較新的熱性合金 AF2-1DA 性能則更加優越。Inconel 718 為鎳鎢基合金，由添加鈮 (Nb) 經時效處理得以產生 γ' 析出硬化與一般鎳基超合金析出 γ' 者不同，焊接性良好。鎳基超合金有早期的 713C、IN-100、B-1900、Udimet 500 和 Ren'e 77，和較新的 Ren'e 80、IN-738、Mar-M241、Udimet 710 等。鎳基合金儼然已成爲渦輪用高溫材料的主流。

在過去四十年中渦輪葉片材料的發展可用圖 1 來表明⁽⁷⁾。圖中縱坐標爲溫度能力 (temperature capability)，用以區別超合金性能的高低，所謂溫度能力是指在 20,000 psi 應力破斷測試條件下能維持 100 hr 壽命的測試溫度。由圖可知超合金的溫度能力逐年節節上升，進步的原因不僅是從成份的改良而來，且同時受益於製程的刷新。關於製程的進步我們將在下節加以闡述。

我們把超合金目前的用途列於表 1，超合金的主要用途乃在航空太空和氣渦輪，佔市場需求量的百分之九十。

表 1 超合金在美國的用途⁽⁷⁾

應 用	所佔總量 %
航空太空	
氣渦輪	72
航空機具構架	8
發電	
氣渦輪	10
核 能	2
化石燃料	1
化學製程	6
雜項 (包括：運輸、海洋、污染控制等)	1

超合金材料爲高科技產品，是發展航空太空工業所必需的材料。爲奠定我國航空工業的基礎，我國超合金的發展將在中山科學研究院的領先倡導下一步一步的實現。我國的航空工

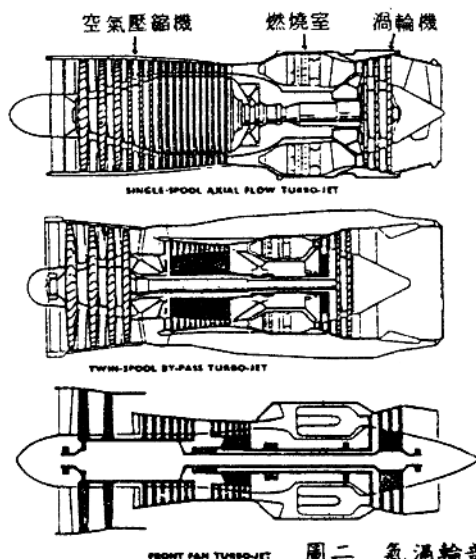
業發軔於對日抗戰期間，那時在貴州大定和廣東清水設有飛機發動機製造廠，戰後遷移台灣。我國自行設計製造的飛機先後計有：介壽號教練機，中興號教練機、XC-2 中型運輸機、和 AT-3 噴射教練機，這些飛機在大眾傳播媒體上都有介紹，不再贅述。

氣渦輪的解剖

氣渦輪如圖 2 所示的剖面圖⁽¹⁾，可以看成是一個圓筒狀物體，空氣由一方進入，經過軸流式壓縮機壓縮，通過燃燒室時煤油類燃料在此燃燒，使其總能量增加，再經過渦輪機向後由噴嘴噴出，噴氣的動量造成推力。由燃料燃燒而得的高壓熱氣在通過渦輪機時利用一部份能量帶動渦輪機，進而帶動壓縮機壓縮進氣（早年的氣渦輪也有採用離心式壓縮機者）。

比推力 (specific thrust, 單位爲 lbf. sec/lb) 及比燃料耗用量 (specific fuel consumption, 單位 lb/hr/lb 推力) 是二個評判氣渦輪成效優劣的數據，而這二個數據都與渦輪機進氣溫度（亦即氣體離開燃燒室的溫度）和進氣壓縮比有關。在壓縮比不變情形下較高的進氣溫度可以增加比推力，雖然此時比燃料耗用量也略有增加，若進氣溫度不變，增加壓縮比可改善比燃料耗用量⁽¹⁾。是故，提高進氣溫度和採用高壓縮比可增加氣渦輪的總體效率。以普業特·惠特尼 (Pratt & Whitney) 公司生產的 F100-PW-100 噴射引擎爲例，其進氣溫度達 1400°C，壓縮比爲 24.8:1，渦輪機轉速 9,600 rpm，後部壓縮機轉速 14,500 rpm，此種引擎係使用於戰鬥機 F15 及 F16。英國勞斯勞萊 (Rolls-Royce) 公司製造的 RB 211 引擎的壓縮比亦已採用 25:1。經過壓縮後的空氣，溫度約達 600°C。這二種引擎都採用了空氣冷卻的渦輪葉片⁽⁹⁾。

氣渦輪的操作溫度受限於材料的高溫性質，不能無限度的提高。氣渦輪中接觸高溫的零組件大都採用超合金製造，F100 引擎約有一半重量爲超合金，其餘百分之三十爲鈦合金，百分之二十爲鋼類。爲求適應引擎各部份對材料性能的不同要求，材料的選擇十分重要。



ROLLS-ROYCE "AVON"

ROLLS-ROYCE "CONWAY"

PRATT & WHITNEY JT3D

圖二 氣渦輪剖面圖

(1) 壓縮機葉片材料

高壓壓縮機的轉速超過 10,000rpm，直昇機引擎的轉速更高，故離心力極高，葉片材料的基本需求為比抗拉強度 (specific tensile strength) 要高，疲勞強度亦甚重要，而在壓縮機的高壓端溫度會上升至 600°C，故材料尚需具備高溫強度。葉片的設計應使其自然振動頻率不要與外間激發頻率相合或成倍數，致引起共振。故材料應具備高的楊氏模數 (E) 及低密度 (ρ)，因 E/ρ 是決定頻率的因素之一。氣渦輪吸入的空氣可能有腐蝕性，例如飛越海洋上空的噴射機，直昇機和海域油井的發電設備，空氣也許含有沙粒，像沙漠地區。葉片材料應具抗蝕性，合金表面一經腐蝕，其疲勞強度即大幅度下降。

早期葉片材料採用鋁合金，但當葉片溫度超過 200°C 時鋁合金便不適用，在五十年代開始改用 12% Cr 麻田散型鋼類。其優點為價廉和低密度。至五十年代中葉，鈦合金的比強度優良性已獲認知，而被採用於壓縮機葉片，六十年代中使用更廣，至今不衰，同時壓縮機葉輪也採用鈦合金製造。在低溫端，葉片採用超合金並不相宜，因其價昂。但在溫度趨近 600°C 時，合金鋼及鈦合金的強度迅速下降，

此時便用到超合金了。最常用的超合金有 Inconel 718，Nimonic 901 (Incoloy 901)，Nimonic 942 和 Waspaloy 等。Nimonic 901 和 942 有極佳的抗蝕性，可能由於含有高量鉬之數。

(2) 渦輪機葉片材料

一具氣渦輪的成效與通過渦輪機的燃氣溫度有關，氣渦輪設計師一直想提高渦輪機的進氣溫度，以便提高效率，但常受限於組件的可靠度和材料的性能。

在過去四十多年中，渦輪葉片材料的發展日新月異，不但材料强度高更能耐受高溫，且葉片的設計也出現了內部有複雜孔道，由氣流冷卻的產品。

渦輪轉子葉片 (rotor blade) 要在高壓力、高溫、氧化、腐蝕和沖蝕的情況下操作，所受環境嚴酷的考驗比其他氣渦輪組件更甚。渦輪機在高速轉動下葉片尖端的線速可達 390 m/sec.，進氣溫度高達 700~1400°C，以 600 m/sec. 的速度掃過渦輪機。由離心力導致葉片承受恆定的張應力。並且重疊了氣體流過葉面所致的波動應力。高溫和張應力會引起潛變，溫度的起伏會引起熱疲勞。燃氣是具有高度氧化性的；燃油會含有硫份，近海地區則空氣中雜有塩份，都足以造成高溫腐蝕；空中的灰

塵砂粒和燃燒產物中的碳粒也會引起沖蝕。故葉片材料不僅要有高溫強度，尚須能夠抵抗腐蝕和沖蝕，同時可以耐受重疊的疲勞應力和衝擊負荷，而能維持較長的操作壽命。葉片材料的密度不宜過高，密度不僅影響離心負荷，且使葉輪設計增加重量方能支持葉片。

目前適合做葉片的材料只有鎳基超合金，渦輪葉片所需的性能鎳基超合金大多具備，不過在耐氧化和腐蝕方面稍嫌不足，所以葉片需加添一層保護覆層(protective coating)。

葉片由製造方法的不同可分為熱性葉片(wrought blades)和鑄造葉片(cast blades)二類。美國一向採用鑄造葉片，英國過去熱衷於熱性葉片，近來亦已傾向於鑄造葉片了。但工業用氣渦輪仍將繼續走熱性材料之途。

(a) 熱性葉片

在目前氣渦輪的操作情況下，大多數葉片損壞的原因是潛變破斷(creep rupture)。故超合金的優劣可以用潛變破斷壽命來作評準。如將潛變應力定於某一數值(例如 100 N/mm^2)，潛變破斷壽命也定於某一數值(例如 1000 h)，則潛變溫度，或稱溫度能力，便可以測出超合金的優劣等級。用這方法排列，英國所用的熱性超合金可得到下列次序：Nimonic 75, Nimonic 80A, Nimonic 90, Nimonic 105, Nimonic 115, Nimonic 118 等。這些材料越向後溫度能力越高。美國所用的熱性鎳基超合金則有：Inconel X 750, Udimet 500, Udimet 700, Waspaloy, Udimet 710, Udimet 720 等。

熱性葉片是鍛、軋、擠型所製成的棒條經過切削而成，較簡單的合金可採用傳統式切削技術，較新式的合金則需採用電化學蝕刻。葉片也可用精密鍛造鍛成接近成品形狀的雛型，再經切削而成。有冷卻孔道的葉片則在棒體鑽孔填入某種合金，擠型和鍛造後以酸液溶去孔道中合金。

鎳基超合金高溫強度的改進主要由添加 Cr, Mo, W, Ta 等合金使其產生因溶體強化和添加 Al, Ti 等產生析出強化，析出物 $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ 稱為 γ' 。超合金中合金愈加愈多，但在高溫長期保持組織穩定為條件，亦即不應由合

金添加產生 σ 等不良相為限。合金含量高時能降低合金的固相線溫度(solidus temperature)和增加析出物 γ' 固溶溫度(solvus temperature)。一般情形，熱作溫度多在 γ' 固溶溫度之上，以便利用此時較低的強度和較高的延性。因此合金愈進步熱作溫度範圍愈狹窄，使鍛軋工作發生困難，許多高溫強度極為優秀的超合金只能用鑄造法製造。

自五十年代真空熔煉法興起後，超合金中反應性硬化元素鈦及鋁的氧化損失得以防止。熱性合金大多需經過二次真空熔煉，初次熔煉用 VIM(真空感應熔煉法)配製合金，做成錠塊，作為二次熔煉的電極。二次熔煉可用 VAR(真空電弧重熔)，或 ESR(電渣重熔)，以改良錠塊化學均勻性和結晶狀態。在真空熔煉過程中，許多在原料中存在的有害雜質如 Bi, Pb 和 Te 可以由揮發除去。這些雜質含量雖微，但會嚴重損害合金的潛變強度和延性。除去後對熱作性有顯著的改善。

(b) 鑄造葉片

現時鑄造葉片的方法多採用真空包模鑄造法(vacuum investment casting process)，這是一種精密鑄造方法，能做出形狀複雜的葉片，且利用陶瓷泥心(ceramic core)可以做出有冷卻孔道的葉片。鑄造葉片只需少量切削，或不必要切削，故頗具經濟效益。目前鑄造葉片性能優異，可靠度高，其溫度能力常超過熱性合金。熱性合金具有均質性和齊一性的冶金組織，這一優點却是鑄性合金所不及。

鑄性合金溫度能力高的原因係由於加入大量的鋁和鈦，增加了 γ' 析出物的容積百分比，同時由加入 W, Mo, Cr 等合金元素得到因溶強化，並且，鑄件有較粗大的晶粒也對高溫性質有利。

在英國發展了一系列以 Nimocast 為名的鑄性鎳超合金，最初出現的 Nimocast 75, 80, 和 90 是由熱性合金 Nimonic 75, 80 A 和 90 改作鑄造用途而來。此後為改善強度陸續發展了 Nimocast PE 10, Nimocast 242, Nimocast 713, Nimocast PK24 和 Nimocast PD 21。

Nimoncast PE10 含合金元素Nb，可在空氣中鑄造，高溫抗拉力佳，用於中應力及870°C以內的組件。Nimoncast 242 係由Rolls-Royce Ltd發展成功，可用大氣熔煉，有極佳的熱震抗力，良好的蠕變抗力，常用於靜葉片。

Nimoncast 713 蠕變抗力強，鑄造性良好，有極佳的熱疲勞性能，可用真空或大氣熔煉。該合金有一低碳改良型合金名 Nimoncast 713LC，低溫強度和延性較佳，特別適用於葉片和葉輪連體鑄件。為避免鑄性合金在高溫下產生脆性金屬中間相，較新的強力合金多採用低含鉛量，例如：Nimoncast PD16 和 Nimoncast PD 21，各含鉛6.0%及5.8%。合金強度雖不受影響，但腐蝕和氧化抗力却嚴重受損。因此有一種強度相似於Nimoncast 713，但腐蝕抗力較高的高含鉛量合金發展出來。它名叫Nimoncast 738，廣用於海洋及工業氣渦輪。在工業上腐蝕環境更不利時和長時間使用不需維護時，可採用Nimoncast 739 做葉片材料，該合金含鉛量更高。

高強度的合金如Nimoncast PK24（相當於IN100），其密度甚低，Nimoncast PD16 的強度則更為提高，在1050°C內有極佳蠕變破斷性質，其低碳品種稱Nimoncast PD21。新近以W，Ta，Nb等耐火金屬加入鎳基超合金，英美二國各發展了M22和Mar M246。英國以Hf加入這類合金中以改善其中溫（850°C左右）的延性，而發展出Mar M002。

在美國最早用真空澆鑄的超合金為Inco 713C，隨後有低碳型出現。早期發展高強度合金以添加鈦和鋁為手段，1960年以此種方法發展了IN100，鈦加鋁總含量超過10%，因此組織中有極高的 γ' 容積百分比，約達60-70%。其後發現此成份長期暴露於中溫後，組織不安定會生成 σ 相，損害蠕變破斷性質。因而採用「相計算」（PHACOMP）法檢查成份，減低鈦含量，限制了不良相的產生。

1960年代中段，奇異公司（G.E.）根據相計算技術修改Astroloy和Udimet 700而成Ren'e 77，至六十年代末又推出Ren'e 80，其破斷強度和熱腐蝕抗力比Ren'e 77較佳。

六十年代末期，採用低鈦鋁比以改善鑄造性，多加Mo和Ta以加深固溶強化，發展了B1900。Martin Metals公司以W代替Mo發展了Mar M200。因這類合金中溫蠕變破斷延性不夠，1969年由添加2% Hf得以改善此缺點，或由添加少量硼而達此目的。

中溫延性問題與晶界脆弱有關，Pratt and Whitney公司用除去垂直於應力方向的晶界的方法解決此一困難。因此發展了柱狀晶粒組織，隨後又發展了單晶。這是用單向凝固技術（directional solidification）鑄成的葉片，以Mar M200鑄成的柱狀晶粒和單晶為例，其熱疲勞抗力、蠕變壽命、和延性都要比傳統鑄件高得多。因為單晶材料不需要晶界部份強化用合金元素例如C，B，Zr等，遂有許多單晶專用的超合金發展出來，像P & W 444，P & W 454，NASAIR 100，RR-SR99都屬此類材料。

(c) 靜葉片 (nozzle guide vanes 或 turbine vanes)

這是靜態的組件，可將燃燒室出來的熱氣導至渦輪葉片，因不必旋轉，故設計要求不同於渦輪葉片。靜葉片所受應力不高，但所受溫度往往高達1100°C，故材料需具有高溫蠕變強度、熱疲勞抗力、氧化、腐蝕和沖蝕抗力。其他次要性質要求有衝擊強度、鑄造性、組織安定性等，與葉片要求者相似。過去使用鍛造法製造靜葉片，但複雜形狀和內有冷卻孔道者需用精密鑄造。在美國多採用鈦基合金，但使用鎳基超合金也很成功，例如Nimoncast PD 16和Nimoncast 242。美國的F100引擎採用IN100和氧化物散布強化（O.D.S.）MA734。此外尚有Haynes stellite 21和31。

(3) 葉輪 (turbine discs)

葉輪係在高轉速下操作，轉速約在5000-30,000 rpm，依葉輪大小和引擎型式而定。葉輪對材料性能的要求十分複雜。在葉輪近輪轂部份溫度雖低但受應力極高，此處需求為高的抗拉強度和降伏強度以及良好的張力延性，在輪緣部則溫度高，需要優良的蠕變破斷性能。六十年代開始發現葉輪的低週期疲勞強度（

low-cycle fatigue strength) 為限制葉輪壽命的極重要因素。引擎每發動及停止一次，便由機械性和受熱性所造成的應力完成一個應力週期，多次飛行所做的發動和停機會造成葉輪材料的低週期疲勞，終至斷裂毀損。所以材料內部須清潔無夾渣，外部切削面要避免應力引發點 (stress raisers) 如劃痕之類。為加強可靠性，須注意材料的裂痕擴張特性、破斷韌性 (fracture toughness) 和低週期疲勞強度，這些都與材料的顯微組織有關，而由熱作變形情況和熱處理過程控制。

英國最早在 1952 年時葉輪採用 Nimonic 90 葉片材料，1961 開始用 Nimonic PK31，1964 用 Nimonic 901 (即 Incoloy 901)，1971 用 Nimonic 942，1970 美國採用 Waspaloy，此後又有 Inconel 718、713C、713LC，和 706。Nimonic 901 和 942 和 Waspaloy 都是做葉輪常用的材料。Inconel 718 和 706 在美國製氣渦輪中使用甚廣，除葉輪外尚做其他組件。

為避免高強度材料鍛造的困難和嚴重的偏析 (segregation) 問題，遂發展了粉末冶金技術製造的氣渦輪組件。用粉末冶金製造的超合金和傳統方法製造的超合金比較，強度要高得多。但粉末冶金產品在製造過程中必須特別小心，不能受到氧和灰塵等污染，以免超合金中有夾雜物存在，損害其韌性和疲勞強度。

常用於粉末冶金的材料包括 Astroloy，Ren'e 95，IN-100，和 IN-792 等。Pratt & Whitney 購自 IN-100，G.E. 公司則偏愛 Ren'e 95。英國 Wiggin 公司則發展了 APK 1 合金，據稱該合金對降伏強度、蠕變強度、低週期疲勞、組織安定性、和熱作性有最佳的配合。該合金係由 Astroloy 降低含碳量而來。

(4) 主軸

氣渦輪主軸的功能是將渦輪機葉輪所產生的扭力傳遞至壓縮機轉盤 (亦即葉輪)。在工業用氣渦輪，主軸係用於帶動其他機械，如交流發電機、壓縮機，或者在輪機螺旋槳 (turboprop) 的情形係用以帶動螺旋槳。大多數主軸係在中溫操作，主軸應具有高降伏強度，並能經由滲碳或氮化處理使表面硬化，以抵抗磨

損。這些要求可由低合金鋼達成，例如 3 %Cr-Mo 鋼，在美國也曾採用過麻時效鋼 (maraging steel)，和麻田散體不銹鋼，如 FV448。用於做主軸的材料最好經過 VAR 或 ESR 熔煉。

在高成效的航空引擎，主軸自身往往處於高溫狀態，或者主軸與葉輪需做冶金接合，則主軸應與葉輪採取同樣材料。鎳基超合金如 Nimonic 系列合金 80A、90、901、Waspaloy 或 Inconel 718 都常用到。

在若干事例中，主軸因溫度的改變沿長度方向的膨脹會引起保持氣密的困難。這時便需要良好機械強度和低膨脹係二種合金已使用於軍用噴射機引擎中。

(5) 燃燒室和外壳

氣渦輪的外壳從進氣部份開始，包圍了整個機體，至最後廢氣噴出的凸緣為止，是由各種形狀的組件構成，但大多由片狀材料製造。外壳的作用在引導氣流，固定非旋轉零件，並使氣渦輪整體得以與外界友架連接。引擎內各種溫度和壓力的變化都要由不同的組件承受，其中溫度最高的部份為燃燒室。燃燒室所受溫度常超過 1100°C，平均約在 800°C。這一部份的材料需優良的氧化抗力、熱疲勞抗力、高的蠕變和降伏強度，和腐蝕抗力。同時尚需良好的打造性和焊接性。

構成外壳的圈環係以鍛造或軋延法製成，再經切削加工，或以片體組中壓焊接製成。所用材料低溫部份多採用低合金鋼、鋁合金、和鈦合金。高溫部份如燃燒室多採用鎳基超合金。固溶強化的合金如 Nimonic 75 和 Nimonic PE 13 做成的片體是最常用到的合金，後者成份與 Hastelloy X 相同。其後為適應高應力組件的需要發展了 Nimonic C 263，而 Nimonic PE 7、PE 11 和 PE 16 也相繼出現，這都是含 Al 及 Ti 的合金，可作析出硬化。PE 7 和 PE 11 須限於 550°C 以下操作，焊接後做時效處理即可。更佳的抗氧化合金有固溶強化的 Nimonic 86 和 Inconel 617，前者由添加少量鈾 (Ce) 而增加了抗氧化性。新近燃燒室已有用散布強化的鎳基超合金者。

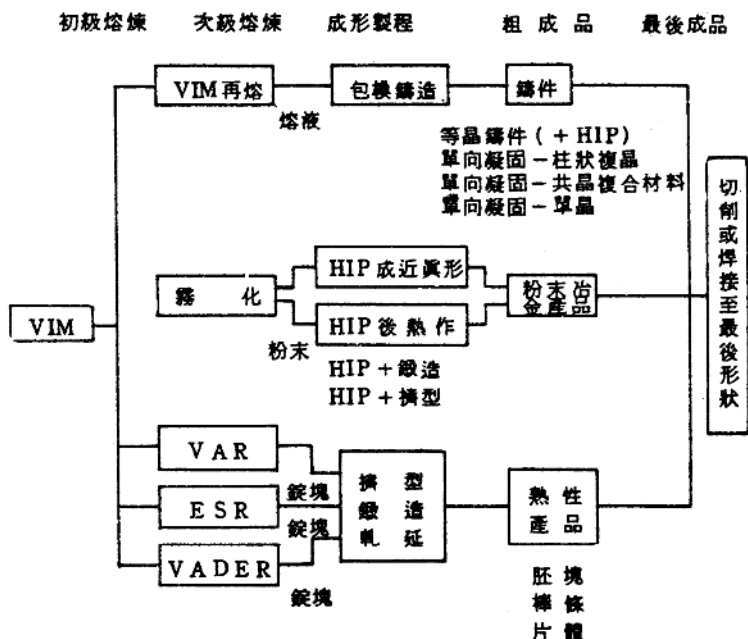
(6) 軸承和齒輪

氣渦輪球軸承材料可分為整體硬化和表面硬化二類。整體硬化材料最初用 1 % C 鉻鋼 (En 31)，其後這種鋼改用 VAR 真空熔煉使軸承壽命增加了四倍。但因 En 31 耐熱性不夠而代之以 18-4-1 高速工具鋼，並採用 ESR 熔煉，美國則使用 M 50 高速工具鋼做球軸承，該材料經雙重真空熔煉。最重要的表面硬化軸承材料便是 S82，同時這種材料也在氣渦輪中廣用於直軸和齒輪的製造。其後為解決高溫強度的需要發展了 RBD，含 10 % W，0.2 % C；亦即是 18-4-1 鋼的基底成份，由 VAR 熔煉。齒輪材料除 S82 外，未來可能採用更強力的鋼如 Rex 720。

超合金的製程

超合金可靠度的要求至為嚴格，所以超合金成份的變動範圍、有害氣體含量，和清潔度都受到極大限制。要達到這些目的，現時超合金的熔煉差不多第一步都要採用真空感應熔煉 (Vacuum induction melting, VIM)，請參

閱圖 3。感應電爐的爐襯通常使用鹼性耐火材料例如氧化鎂，另加氧化鋁或氧化鉻，俾造成尖晶石 (spinel) 結構。爐中先加入主要合金成份如 Ni, Fe, Co, Mo 和其他反應性不強的元素，同時加入清潔的合金原料。加料迅速熔化。此時熔體上有渣料保護，鉻即在此時加入。最後加入鋁、鈦、硼和銅等，硼和鉛常和鐵造成母合金加入。熔體經取樣分析，並調節成份和溫度，然後澆鑄成錠塊。若干揮發性元素如鉛、銀和鉍可以在真空精鍊時除去。在真空中熔煉超合金可以免除合金元素如鋁和鈦的損失，便於控制成份，並且加速溶氣從熔體中逸逸。雖然如此，由於使用陶瓷性氧化物坩堝，合金中難免有外表非金屬夾雜物的存在。目前補救之道是使用陶瓷濾網過濾，以及採用電子束精鍊技術改進 VIM 錠塊的品質。VIM 鑄錠在組織上也有重大的缺失。鑄錠因為斷面大，冷卻慢，致發生合金的偏析，和晶粒粗大，且大小和形狀不均一。這種不均質的顯微組織不利於熱作。



圖三 生產超合金組件的各種製程，熱處理、覆膜、各項檢驗等步驟省略

增進VIM鑄錠熱作性的方法之一便是以VIM錠作為消耗性電極以真空電弧重熔法(vacuum arc remelting, VAR)重新鑄出錠塊。以VAR法重熔超合金時凝固區域熔融金屬的容積比VIM法較小。電渣重熔法(electroslag remelting, ESR)也可用以重熔VIM錠,這二種方法都能使偏析減低、晶粒改善、內部完善和得到合意的表面品質。

由VIM/VAR或VIM/ESR所得錠塊通常可用熱作方法例如擠型、壓鍛、模鍛、熱軋等做成胚塊、棒條、和片體。鍛造方法可以做出氣渦輪所用的葉輪,主軸和大型葉片。VAR和ESR合金錠雖然偏析程度已大幅度降低,但仍須做均質化處理(homogenizing),俾減低微偏析。鍛造較大葉輪時常須再熱數次,高溫強度甚高的新合金鍛造溫度範圍至為狹小,例如Nimonic 901為1150℃至1050℃,Nimonic PK31為1160℃至1100℃。

當超合金的溫度能力不斷提高之際,合金含量增加,熱作性則隨之下降。這時便不得不將VIM錠予以再熔,利用包模法澆鑄鑄件。這方法是首先做出蠟型,然後澆漿,以耐火材料粉末黏附在蠟型上,一層一層地加厚,做成壳模。壳模中的蠟可由加熱除去,再將壳模加熱至澆鑄溫度,即可注入合金熔液。合金係在VIM爐中熔融,於真空中澆鑄壳模中。用這方法可以生產形狀複雜的複晶粒靜葉片和葉片,經過切削可以得到最後成品。因為鑄件常有孔隙等缺陷,現時把鑄件加以熱均壓(HIP)處理,即可消除孔隙,效果良好。廢舊的葉片現時也可用HIP法予以再生。

應用單向凝固技術,包模鑄件可以做成柱狀晶粒和單晶。這種柱狀晶粒和單晶葉片已在商業上開始應用,是目前抗熱性能最佳的超合金製品。

用粉末冶金方法製造的超合金葉輪具有細微的顯微組織,且偏析極為輕微。粉末冶金製出的高強度超合金有較佳的熱作性,因粉末冶金製品能接近淨形,比用鍛造法使用材料較經濟,且加工切削量也較少。超合金粉末是由真空鑄造的錠塊熔後加以惰性氣霧化,或用真

轉電極法,或溶氣法製成。粉末的固結可採用熱擠型或HIP。HIP產品也可再經鍛造。一般情形,粉末冶金超合金比傳統熱作超合金有更高的強度,但抗熱性不及高強度鑄性超合金。因高強度超合金在週期性和衝擊性負荷下對材料中缺陷十分敏感,故材料中不能含有陶瓷質夾雜物,這種陶瓷質的來源常是VIM爐的坩堝和粉末霧化的噴嘴。要免除夾雜物現時已有陶瓷濾網過濾法發展出來,另外使用電子束精煉法也是一條可行的途徑。現時超合金粉末的製造已採用無塵室設施粉末中陶瓷雜質也可用超細顆粒分離設備除去⁽¹⁷⁾。

新技術的追求

超合金技術在過去四十餘年中不斷的進步,在材料科技造成重大的衝擊,目前新的科技仍在繼續出現,其中有的科技已達實用階段,有的還未成熟。

1. 真空電弧雙電極再熔法(vacuum arc double electrode remelt, VADER):這是一種熔製高強度超合金錠塊供熱作使用的一種再熔方法,由美國特殊金屬公司所發展。該方法在一真空容器中裝置二只水平電極成一直線,二電極的間隙可產生電弧,使二個電極同時熔化,有金屬滴落下,凝固成金屬錠。金屬滴溫度略低於合金的液相線,故內含固體小粒,能作為錠塊結晶核心,使錠塊晶粒細小而成等軸形。該法比VAR法較少耗用能源,且能免去坩堝陶瓷物的污染⁽⁴⁾。

2. Gatorizing 鍛造法:美國Pratt & Whitney公司發展了Gatorizing鍛造法,用這方法製造的超合金IN 100葉輪已應用於F-100引擎。先將超合金粉末以擠壓法在變形量和溫度的嚴格控制下造成細晶粒胚塊,此時材料成為暫態的超塑性(super plasticity),具低強度和高延性。次以低應變率在加熱模具中恆溫鍛造成接近淨形。鍛件再經熱處理即可回復為正常的高強度狀態。

3. 單向凝固(directional solidification):將包模法製造的陶模在下端連接一塊水冷的銅板,陶模內澆鑄合金後在一座加熱爐中

緩慢向下移動，使合金由下向上凝固，由此可以得垂直的柱狀晶粒鑄件。如果陶模下面裝置螺旋狀晶體選擇器，使鑄件凝固時只有一個晶體向上生長，則成一個單晶鑄件。柱狀晶粒和單晶鑄件因為消除了橫向的晶界有利於潛變性質的改善，故有極佳的高溫機械性質。目前能用於單向凝固技術的超合金有很多種，例如 Mar M200 + Hf, Mar M247, IN 713 LC, IN 100 等。

如果單向凝固鑄件所用超合金為一種共晶成份，則鑄件中能生長有加強效果的平行纖維或夾層，纖維的成份有：TaC, NbC 或 Cr_3C_2 等，夾層的成份有 Ni₃Nb。有二種超合金名為 COTAC 74 和 COTAC 744 能在超合金基地 (γ/γ') 中長出 NbC 纖維。

4. 快速凝固速率法 (rapid solidification rate, RSR) 製程：普通以氬氣霧化的粉末，其冷卻速率為 10^2 °C/sec，但快速凝固率所得粉末的冷卻速率為 10^5 至 10^6 °C/sec。Pratt & Whitney 發展的這種離心霧化法採用一座快速旋轉的水平圓盤，其轉速在 24,000 rpm 左右，承接由 VIM 熔化的超合金液流，把合金排出成為小粒，再經氬氣噴流冷卻凝固為粉末。這種 RSR 粉末多呈實心體、圓球狀、直徑約在 10 至 100 μ m 之間。RSR 粉末可用 HIP，擠型法或快速燒結技術如動力壓縮使成形法予以固結。

RSR 粉末的顯微組織較為獨特，此種粉末可視為冷卻速率極大時所構造成的鑄件。較大的顆粒仍有樹枝狀組織，但偏析已極為細微，在較小的顆粒冷速大於 10^6 °C/sec 時樹枝狀組織不再出現，代之而起的是為微晶 (microcrystalline structure)。這種粉末的組織較為均質性、有較寬廣的固溶度、準穩定的結晶相 (metastable crystalline phase) 或非晶態固體 (amorphous solids)。由 RSR 粉末製造新的合金具有極大潛力，為近年來研究人員目光集中的課題。

Pratt & Whitney 公司發展了一種鎳基超合金，以鋁作固溶體強化，以鋁提供腐蝕抗力，名為 RSR 185，不含鈷及鉕戰略材料。這種鎳

一鉍—鋁合金以 RSR 法產製粉末後再經固結成形，可擁有高容積比率的 γ' ，潛變抗力極佳，可做渦輪葉片。

5. 動力壓型 (dynamic compaction)：動力壓型是利用炸藥推動一個高速投射物，用來壓縮粉末。或者利用炸藥在粉末盛裏外直接爆炸；二法都能產生震波，在極短時間內令粉末局部熔融而達燒結的目的。故動力壓型的效果與 HIP 相似，不需再經燒結步驟。這方法的最大優點為能確保 RSR 粉末的特性，例如非晶態組織和新的合金相。

6. 單向再結晶 (directional recrystallization)：非晶態材料粉末固結後可以利用緩慢移動一個熱梯度的方法使組件由一端向另一端生長晶體，其情形很像熔融合金中生長柱狀晶體，故模仿單向凝固技術，而發展了單向再結晶技術。超合金通常不易製成非晶態材料，但可以利用 RSR 粉末經擠型和軋壓後做單向晶粒粗化 (directional grain coarsening) 處理⁽¹⁷⁾。晶粒粗化溫度在 γ' 固溶點至初熔溫度 (incipient melting temperature) 之間，溫度梯度約在 40—80 °C/cm，移動速率為 0.5—2.5 cm/h。單向晶粒粗化技術主要應用於 ODS 超合金，也曾施行於 P/M IN738，都是在超塑性成形後或經臨界應變後，加以單向晶粒粗化。其晶粒成為長形且晶粒方位一致後對應力破斷性質有極大改善。

7. ODS 超合金 (oxide dispersion strengthened superalloy)：以 γ' 加強的鎳基超合金一般情形在 γ' 固溶點以下時即大幅失去強度，這是因為 γ' 成為不規則化，且形狀呈不穩定之故。相反的，ODS 合金至少在理論上講可以在接近鎳的熔點溫度時維持相當潛變抗力於不變。ODS 超合金大多添加 2% 以內的 Y_2O_3 微粒而成。採用 Y_2O_3 的原因是因為它在基底中溶解度低，擴散率低，熔點高，且本身化學穩定性高（負生成熱高）不易為超合金組成份還原。這種超合金以粉末冶金技術製造，氧化物添加的方法用機械合金法 (mechanical alloying)，即是以 Y_2O_3 粉和超合金原料粉末混和在一種球磨機 attritor 中研磨。氧化

物顆粒可以經冷焊作用夾雜在粉末內部。此時氧化物顆粒十分細小且作均勻的分布。ODS超合金依靠 γ' 析出物及碳化物維持中溫強度，而氧化物顆粒則能在更高溫度保持穩定，發揮強化合金的功能。

ODS粉末的固結方法可採用擠型或 HIP，然後熱作至粗胚或淨形，再經晶粒粗化熱處理，最後切削成產品。目前製造步驟趨向於擠型，因用擠型方法製出的材料可用單向晶粒粗化法得到長條形晶粒。晶粒粗化時使用區限退火 (zone annealing)，溫度為 γ' 固溶溫度，結果十分良好。ODS 超合金不僅在高温強度上勝過 γ' 強化的超合金，且在週期性潛變 (cyclic creep) 行為上表現優異，即當負荷的起伏頻率增加時，ODS超合金的最低應變率降低，同時破斷壽命增加。

目前 ODS 超合金 MA 254 已用於靜葉片，最新的 ODS 超合金 MA 6000 E 有極佳的高温抗拉強度和潛變破斷性質，現已用以製作渦輪葉片。在發展中的 ODS 超合金 Alloy 49 γ' 的容積百分比甚高，故中溫強度良好，頗有發展潛力。

8. 金屬間化合物 (intermetallic compounds)：大多數鎳基超合金都是以 γ' 析出物強化的， γ' 是一種金屬間化合物 Ni_3Al ，為規律化合金 (ordered alloy)。它有一項與眾不同的特性，即其降伏強度隨溫度升高而增加，直至 900 $^{\circ}\text{C}$ 附近才陡然降落。在鎳基超合金中 γ' 的容積比有的較低，例如 Waspaloy 為 20%，Udimet 700 為 45%，而 Mar M247 則高達 55%；合金強度因之增高⁽⁴⁾。如採用 100% Ni_3Al 豈不更好，但試驗結果發現這種材料有很高脆性。新近，脆性問題已獲得合理解決，由添加硼及鉛等微量合金元素可使合金抗拉延性有重大的改進。以 Ni_3Al 製造葉片的最大優點為 Ni_3Al 材料密度比一般超合金為低，故所受離心力也低。金屬間化合物當然不只 Ni_3Al 一種，目前受到注意，積極研究中的金屬合金有： Fe_3Al ， Ti_3Al ， NiAl ， FeAl ， TiAl 等鋁化合物， $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Fe})_3\text{V}$ ， $(\text{Co}, \text{Fe})_3\text{V}$ ， $(\text{Ni}, \text{Fe})_3\text{V}$ 等鈦化合物，以及 Ni_3Mo

， Ni_3Ta 和 Ni_3Nb 等。

9. 擴散接合 (diffusion bonding)：高強度鎳基超合金往往不宜用熔融法焊接方法接合，尤其是粉末冶金材料為然。多數以 γ' 加強的粉末冶金材料都對熔融焊接方法敏感，焊後會出現微裂紋，空洞和焊縫熱影響區碳化物的析出。應用固態擴散接合方法便能免去這些弊害，而焊縫的強度幾乎與母材不相上下。擴散接合是將二個接合平面加壓放在一起，以高温和長時間使接合面間原子發出擴散形成冶金接合。材料的表面的清潔極為重要，須以機械及化學方法清除污染物和氧化物，加熱時應在真空爐中進行。擴散接合方法可分為二種⁽⁴⁾：一種是二個接合件直接接合，另一種是在接合面間夾入一薄層擴散活化層，例如使用 Ni-B 合金薄層⁽⁹⁾。採用後一種方法時所用壓力及溫度較低，因 B 能降低鎳的熔點。俟接合完成，B 向二邊擴散成為超合金的組成物，這時接合縫的熔點又回復到原先水準。

Pratt and Whitney 公司發展了一種有空氣冷卻孔的渦輪葉片⁽⁴⁾，這種葉片先用 D S 法鑄成二半，再以擴散接合方法接成一個完整的葉片。Detroit Diesel Allison 公司應用 HIP 設備做擴散接合，使連體葉片葉輪能由二種不同超合金材料做成。具有葉片的圈環用鑄造的 Mar M246 製成，葉輪用粉末冶金 PA 101 (略相當於 IN 792) 製成。二者擴散接合後比整體用鑄造法做成者溫度能力要高得多，擴散接合達 100% 效率⁽¹⁷⁾。

10. 雷射釉化 (laser glazing)：以高能量雷射光束照射超合金可使其表面熔化，熔體隨即為超合金本體的淬火效應迅速凝固，得到一層成份均勻極少偏析的表面。用雷射釉化方法可以在物件上一層一層的堆積一種合金，得到密實而又完善的塊體。合金材料以細粉或粉末供應，濟雷射熔化而堆積於圓輪上。一種試驗性超合金成份 $\text{Ni}-8\text{a}/0\text{Al}-12\text{a}/0\text{Mo}-3\text{a}/0\text{Ta}$ 和 IN-718 都會堆積在另一種材料上，造成雙金屬圓輪，外層合金厚 125 μm 。合金堆積後尚須加以熱處理，不僅可消除殘留應力，且令其再結晶，使原先的柱狀晶粒細化。

美國的超合金工業⁽¹²⁾

自從噴射機於五十年代中葉開始客貨運業務後，三十年來超合金工業的演進始終未走上一貫作業的路線。目前美國沒有一家公司同時做合金生產、組件製造、引擎裝配等業務。

超合金工業可分為三大類。第一類，主要生產廠商擁有VIM/VAR或VIM/ESR合金熔煉設備，及超合金初步熱作設備。據新近統計資料，美國的VIM產能為每年110百萬磅，此係依每日三班制，每週五個工作日，和65%設備利用率所推算。這數字超出美國1980年超合金尖峯產量80百萬磅/年甚多。並且，在VIM產品下游的超合金製程，在產能上也沒有瓶頸出現的可能。

熱性超合金產品的主體為棒條和胚塊材料。裝置VIM·VAR（及/或ESR）；和初開胚設備（breakdown facility）的代表性生產廠商有特殊金屬公司（Special Metals Corporation, SMC），Teledyne Allvac, Carpenter Technology, Universal-Cyclops Specialty Steel, Cabot Corporation, 和 International Nickel Company。除少數例外，這些公司大多是小公司，也有的公司超合金的生產只不過是產品的一小部份。其中Cabot Corporation也產製超合金片體。

另外一類主要的超合金產品為再熔料（remelt stock），其用途為製造包模及精密鑄件。所有沒有超合金VIM設備的廠商都能供應熔料。這種再熔料不必經過第二次再熔或初步熱作即能出售，許多小工廠都能生產。這些工廠包括Canon Muskegan, 和 Certified Alloys。他們也供應較大廠商母合金。

此外，還有許多廠商以粉末冶金（P/M）路線產製超合金。目前P/M超合金的產量在超合金的總產量上只占極小的百分比。現時生產超合金粉末的廠商有Special Metals Corporation, Carpenter Technology, Universal-Cyclops Specialty Steel, Homogeneous Metals（隸屬United Technologies），Crucible Specialty Metals（隸屬Colt Industries），和Cameron Iron Works

。與鑄錠製成的胚塊和棒條（即經由VIM/VAR製程和初步開胚手續）相比，P/M材料的需求量甚小。在P/M製程未能生產極清淨的粉末前，P/M法產製的接近淨形和固結的胚塊尚不會大量採用。

第二類超合金工業為合金加工業，這些廠商採用胚塊、棒條、片體和再熔料為原料。加工業又可細分為二大主要類型：一類廠商將胚塊和棒條鍛造成接近最後形狀，例如葉輪和葉片，另一類廠商將再熔料鑄造為超合金接近淨形鑄件。做鍛造熱性超合金的廠商有：Wyman Gordon Co., Ladish Co.（隸屬Armco），Cameron Iron Works, 和 Kelsey-Hayes。做包模鑄造接近淨形的葉片的廠商有：Howmet Turbine Components Corp., TRW, 和其他公司。鑄造公司大多生產自身所用的VIM再熔料。Precision Castparts Corp.等公司除生產葉片外尚能產製大型和細晶粒鑄件。Howmet Turbine Components Corp., TRW, 和 Pratt & Whitney（隸屬United Technologies Corp.）等公司擁有生產單向凝固和單晶鑄造葉片和靜葉片所需的高科技，此種技術原先係由Pratt & Whitney所發展。現時因鑄造技術的進步，許多熱性組件都將由鑄件代替。

第三類超合金工業為引擎製造商，屬最大的一類。這類公司製造引擎供應商用客機及軍用噴射機之用，另外有許多公司產製陸上氣渦輪，供發電工業之用。美國二大引擎製造商便是Pratt & Whitney和奇異公司（General Electric Company）。他們都是大公司，引擎的銷售在他們的總營業額中占了極大份量，這情形是不難理解的，發展一具新的引擎費用往往高達十或二十億美元。

還有許多較小的公司其業務目標著眼於民用飛機、戰車引擎、直昇機引擎、船用引擎、和動力引擎。這些公司包括：Garrett Turbine Engine Co., Avco Lycoming Stratford, Detroit Diesel Allison（隸屬General Motors），和Pratt & Whitney of Canada。還有生產火箭引擎的廠商：Teledyne

CAE and Rocketdyne (隸屬Rockwell International Corporation)，後者是太空核主引擎的生產者。

在發電工業上超合金也有大量的應用。製造陸上氣渦輪的廠商有：Westinghouse Electric Corporation 和奇異公司。這類氣渦輪在近東和遠東國家有很大銷售量。

世界各國超合金工業

有鑒於發展新的引擎和飛機需要龐大的經費，並擔負失敗的風險，美國的大公司也不願投資。這時只有二條路可走：一、美國政府為了國家安全支持引擎和飛機製造公司的研究發展計畫，二、美國公司找國外廠商組織合資公司。因此，許多超合金公司都成為國際公司，例如，法國、比利時、日本等國都與美國合作裝配引擎和飛機，而這些產品最後由該國所購用。其結果是若干引擎構造材料如超合金將不可避免的在國外製造。

許多國家已有超合金生產，供自用和外銷。蘇聯和中國大陸都有超合金工業。西德和日本也在發展超合金科技和超合金生產，以求自給自足。不過，西歐國家和日本都須仰賴美國的技術轉移。

英國的超合金技術有二大支柱，即Henry Wiggin Ltd. 和Rolls-Royce (Aeroengines) Ltd. Wiggin公司隸屬加拿大的International Nickel Company，該母公司在美國尚設有Huntington Alloys公司。International Nickel Co. 曾發展了許多使用於美國引擎的超合金，例如IN 718和IN 713。該公司也在美國航空暨太空總署的支助下發展了進步的氧化物散布強化合金。Wiggin公司取得技術，也在英國生產和銷售ODS合金。

Rolls-Royce在六十年代合併了Hawker (Bristol) Siddeley和De Havilland二家引擎公司後，成為英國最大噴射引擎製造商。Rolls-Royce後來因財務困難，其引擎部門已由英國政府接收。該公司會自行發展單晶超合金技術。Rolls-Royce現已與日本石川島播磨重工。Pratt & Whitney和其他公司成立合資公司發展耗費不貲的新式引擎。

法國的國營企業SNECMA是超合金的主顧，以合作方式生產重型引擎，供歐洲型空中巴士之用。法國有一家私營公司Aubert et Duval Company生產超合金。比利時的Fabrique Nationale以技術合作方式生產美國引擎，以色列也同樣方式生產引擎零組件。

日本的最大噴射引擎製造商之一石川島播磨公司由技術合作生產美國引擎獲得最新技術。日本的綜合性高溫材料和氣渦輪工業的發展係由其國際貿易和工業部(MITI)所領導和必要時的經費支助。在美國，政府執行反托辣斯政策，有利於小廠商。在日本，政府鼓勵各公司共享研究成果。日本政府單是支助高溫結構用陶瓷的發展經費每年即高達一千萬美元。日本的重工業也在製造超合金生產設備，供應新興工業國家。

西歐國家間對高溫材料的發展也有聯合研究和資訊傳播計畫。COST-50即係此種計畫，於七十年發起，由歐洲共同市場贊助。雖然英法長久以來即已進行高溫材料的發展，但西德捲入此事尚是近年的事。西德的Leybold-Heraeus公司已成為超合金產製設備的主要供應商，尤其在超合金粉末製造設備有重大貢獻。

國內超合金技術的發展⁽¹⁸⁾

我國超合金的發展起步甚晚，原因是超合金的生產所用製程差不多全要用到高科技設備，例如：VIM，VAR，真空包模鑄造，DS，恆溫鍛造，RSR，HIP等。在過去，人才設備俱感不足。近年來，政府為提升工業層次，大力倡導資本密集及技術密集工業，並訂立材料的發展為重點科技之一。中山科學研究院自成立以來即致力材料科技的研究發展，曾研製成功多種新材料，並由此培養甚多人才。現為配合我國國防工業的發展，於七十年代末期開始做超合金的研究。在過去數年中陸續添置了超合金熔煉、鑄造、加工、以及粉末冶金和檢驗測試設備。

目前國內的超合金研究發展係由工業界、大學和研究機構聯合進行，而由中山科學研究院作樞紐性的連繫和協調。研究範圍擴及超合

金的各方面，例如：VIM超合金配製，VAR及ESR超合金之重熔技術，包模鑄造渦輪葉片，ODS超合金研製，超合金之軋壓，表面鍍層之研究，超合金之熱處理，超合金之高溫蠕變及疲勞，超合金之高溫氧化，超合金之熱腐蝕，超合金成份之分析，超合金產品之檢驗及品管，超合金的焊接和切削加工等，此外尚有超合金科技的基礎研究。近年來有不少大學研究所的碩士論文題目多與超合金科技有關。我國出版的科技雜誌最近也常有介紹超合金的文章。以我國現有的人力物力來衡量，超合金發展的成功應該是指日可待的。

結 論

超合金的發展在過去四十餘年中有神奇的進步，現時高性能的噴射客機和軍用機所以能快速而又省油，應該要歸功於超合金精良的品質。

超合金的發展不僅在成份方面歷經改良，而更重要的在製程方面有許多新技術創造出來，超合金零組件可算是一種不折不扣的高科技產品。

我國為求達到工業升級及科技自給自足的目標已朝向高科技領域邁進，超合金的研究發展正在熱烈展開，一個良好的開始便是成功的保證。

參考文獻

1. G. W. Meethem, The Development of Gas Turbine Materials, Applied Science Publishers Ltd., London, 1981.
2. C. T. Sims and W. C. Hagel, The Superalloys, John Wiley and Sons, New York, 1972.
3. p. R. Sahm and M. O. Speidel, High Temperature Materials in Gas Turbines, Elsevier Scientific Publishing, New York, 1974.
4. R. Brunetaud, et al., High Temperature Alloys for Gas Turbines 1982, D. Reidel Publishing Company, London, 1982.
5. D. Cautsoudis, et al., High Temperature Alloys for Gas Turbines Applied Science Publishers, London, 1978.
6. W. Betteridge and J. Heslop, The Nimonic Alloys, Edward Arnold, London, 1974.
7. John K. Tien, et al., Superalloys 1980, Proceedings of the Fourth International Symposium on Superalloys, American Society for Metals, 1980.
8. Superalloys for Gas Turbine Engineering, Henry Wiggin & Company Ltd., 1976.
9. Yei-Wei Lou (樓宇偉), A Case Study for Advanced Gas Turbine Materials, pratt and Whitney's F-100-PW-100, 材料科學, Vol. 14, Dec. 1982, p.1.
10. Udimet 700, Special Metals Corporation.
11. M. Mclean, Directionally Solidified Materials for High Temperature Service, The Metals Society, London, 1983.

12. John K. Tien and V. C. Nardone, The U.S. Superalloys Industry Status and Outlook, Journal of Metals, September 1984, p.52.
13. John V. Andrews, Consumption of Superalloys: The Five-Year Outlook, in Titanium and Super Alloys Scaling the Peaks, P. Wechsler, ed., Metal Bulletin, 1982, p.42.
14. B. L. Bramfitt, High-Temperature Alloys: Theory and Design, Journal of Metals, September 1985, p.53.
15. G. A. J. Hack, Development in the Production of Oxide Dispersion Strengthened Superalloys, Powder Metallurgy, Vol. 27, No. 2, 1984, p.73.
16. Technology Forecast '81, Trends in Superalloy Technology, Metal Progress, January 1981, p.44.
17. Power Metallurgy Superalloys, Aerospace Materials for the 1980's, Vol. 1 and Vol. 2, A Metal Powder Report Conference, Zurich, 1980.
18. N. N. Hsu (徐念南), Superalloys in Taiwan: Development and Outlook, 73年超合金研討會, 中國材料學學會, 1984. ㊟

(原載: 工程月刊〔台〕1986年59卷12期31—45頁)

1987年《台港及海外中文报刊资料专辑》征订

工业技术 (1987年第1辑至第6辑)

16开 192千字 每辑120页 6辑共720页

平装 定价: 每辑2.00元 6辑共12.00元

本专题选收关于工业技术的综合资料。内容包括: 矿山机械及技术、冶炼技术、化工技术、橡胶工业技术、机械制造工艺设备及其自动化、金属材料及热处理等专业的研究材料和论文等。

本专题共出版6辑, 一次征订, 分辑发行。

读者对象: 工业领导机关、大中型工矿企业、高等工科院校教学人员。