

燃气輪机的金属材料

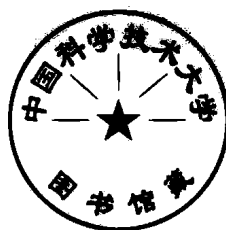
(苏联) П. Б. 米哈依洛夫-米海也夫編著

徐驥航 金 灝 尤云龙 譯

燃气輪机的金属材料

〔苏联〕П. Б. 米哈依洛夫-米海也夫 編著

徐馨航 金 瀨 尤云龙 譯



上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书系統地介紹了現代燃气輪机制造业应用的耐热材料。闡述了渦輪机零件的工作条件,金属材料性能的要求,材料的冶金特点,耐热材料的耐热性和合金化的基本規律等。对各国燃气輪机制造业应用的大量工业合金及其强度特性,也作了詳細的介紹。

可供設計、制造和应用燃气輪机的工程技術人員及生产耐热材料的冶金工作者参考,也可作为高等学校有关专业師生的参考书。

本书一至七章为徐馨航、金灝譯,八至十一章为尤云龙譯。

МЕТАЛЛ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

П. Б. Михайлов-Михеев

Машгиз, 1958

燃气輪机的金属材料

徐馨航 金 灝 尤云龙 譯

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

上海洪兴印刷厂印刷

新华书店上海发行所发行

开本 850×1168 1/32 印張 12 20/32 排版字數 332,000
1964 年 4 月第 1 版 1964 年 4 月第 1 次印刷 印數 1—2,500

統一書号 15119·1782 定价(十二) 1.75 元

原 序

在現代機器制造业的許多課題中，耐热材料問題占有极其重要的地位。如果在高溫載荷条件下不能获得长期工作的耐热合金，許多技術部門，首先是燃气輪机制造业，就不可能发展到現代这样高的水平。

关于現代燃气輪机制造业用耐热合金的文献是极为丰富的，仅在最近十年內，國內外发表的有关这一問題的著作就不下数百篇。要掌握这一广博的、极为复杂的、并在各种期刊上常常表现为相互矛盾的資料，即使是金相学家也会感到很大的困难。这种困难主要是由于耐热合金用途上的特殊性，从而限制了它的情报来源所引起的。

同时，人們又迫切需要通过耐热材料现状問題的报导，在技术文献能够考証的範圍內，对已获得的經驗加以系統地总结。对于从事选择和研究民用燃气輪机結構用耐热材料的設計师和冶金师，首先就具有这种要求。

为满足这一要求，作者按一定系統汇集、分析和整理了所获得的技术文献，就下列两方面进行了論述：

1. 在探索耐热合金合金化的規律性方面所取得的現代冶金理論上的成就；
2. 在研究國內外燃气輪机結構中已获使用的耐热合金方面所取得的冶金实践上的成就。

本书正是总结了这方面的工作，其目的是向讀者尽可能完整地介紹現代燃气輪机制造用的材料。讀者在本书中找不到現代金相学中有关高溫强度方面的一些問題，例如現代蠕变理論的分析，高溫强度标准的評定，蠕变、持久强度、热疲劳試驗方法的叙述，等等。作者有意識地从本书中避开了这些問題，力求在限定的題目

內尽可能完善地闡述有关耐热材料本身的問題。这是由于在我国^①的技术文献中,已經有了許多論述高温强度問題的著作[如 А. М. 包尔茲迪克 (Борздык)、И. А. 奥金格 (Одиг) 等著的书],因此在本书中不再贅述。

在論述現代耐热合金的冶金学和金相学这样一个复杂問題的专题著作中,难免存在一些或大或小的缺点。但是,作者期望本书能对我国机器制造业和冶金工业的工程技术人员有所裨益。

① 本书中所述我国,系指苏联,下同。——譯者注

目 录

原 序

第一章 渦輪機製造用耐熱材料的發展概況	1
1. 燃氣輪機出現前耐熱合金冶金學的成就	1
2. 燃氣輪機出現後引起的耐熱材料的發展概況	4
3. 耐熱材料問題	17
4. 固定式燃氣輪機製造業中耐熱材料的課題	24
第二章 對燃氣輪機金屬的要求	32
1. 在使用各種燃料的渦輪機中金屬的工作特點	32
渦輪機進氣口氣體溫度的意義	33
氣體介質的成分對材料化學穩定性的影響	35
鈦對燃氣輪機的腐蝕	38
2. 對渦輪機零件的物理-機械性能和化學性能的要求	43
燃燒室	43
導向葉片	44
工作葉片	46
渦輪盤和轉子	47
氣缸	51
緊固件	52
熱交換器和氣體管道	52
第三章 生產上的冶金問題	56
1. 高合金化耐熱合金的熔煉和澆鑄	57
2. 熱壓加工的任务和大型渦輪機鍛件的特點	60
3. 葉片的模鍛	65
4. 渦輪機零件的精密鑄造	68
5. 轉子的焊接結構	73
6. 奧氏體合金的鑄造結構和焊接-鑄造結構的冶金特點	77
7. 渦輪機零件的表面保護	84

第四章 耐热合金合金化和强化的基本规律	91
1. 耐热强度的物理前提和特点	91
2. 耐热合金合金化原理	94
3. 成分和组织对珠光体钢耐热强度的影响	98
4. 含 12% 铬不锈钢的强化	103
5. 奥氏体钢和合金的合金化和强化的规律	106
奥氏体的化学成分对热强性的影响	107
半热加工硬化对热强性的影响	109
奥氏体合金中剩余相对热强性的影响	113
6. 影响高合金化耐热合金脆化的重要因素	120
σ 相	121
χ 相	126
475°C 脆性	128
第五章 各种合金元素对耐热性能的影响	130
1. 碳	131
2. 镍	135
3. 铬	138
4. 钴	140
5. 钨	143
6. 钼	145
7. 钒	149
8. 钛	152
9. 铌	154
10. 铝	157
11. 硅	160
12. 锰	163
13. 氮	165
14. 硼	167
15. 稀土元素	170
第六章 耐热合金的分类	172
1. 分类的原则	172
2. 分类表	174
3. 合金的化学成分表	182

第七章 奥氏体耐热钢	189
1. 成分和处理特点	189
2. 用钛稳定的 18-8 钢	193
3. 用铌稳定的 18-8 和 18-12 钢	197
4. 高铬的简单镍铬钢	203
25-12 钢	203
25-20 钢	207
5. 加入少量碳化物形成元素强化的简单镍铬钢	211
18-8Mo、18-12Mo 和 16-13 Mo 钢	211
18-14 (16-13) MoNb 钢	216
6. 用特殊的热机械加工和热处理强化的复杂合金钢	220
16-25-6 (ЭИ395) 钢	220
19-9DL (ЭИ572) 钢	225
G.18B、G.19 和 ЭИ434 钢	230
莱克斯 326 钢	235
莱克斯 337 和 337 A 钢	239
莱克斯 467 钢	242
吉斯卡洛依钢	245
ЭИ612 和 ЭИ612K 钢	249
7. 用作铸件的简单奥氏体钢	253
25-13 (26-12) 钢	253
25-12 W 钢	256
26-20 钢	259
8. 用作铸件的复杂奥氏体钢	262
Л1А-1、Л1А-4 和 Л1А-5 钢	262
Л1А-3 和 Л1А-6 钢	265
第八章 镍基合金	269
1. 成分和处理特点	269
2. 镍木尼克型形变合金	273
镍木尼克 75	273
镍木尼克 80 和 80 A	275
镍木尼克 90 和 95	285
镍木尼克 100	289

3. 因科镍尔型形变合金	292
因科镍尔、因科镍尔 X 和因科镍尔 W	292
因科镍尔 X-550、ЭИ607 和 ЭИ607А	296
因科镍尔 700 及其同类铬钴镍基和铬钴钼镍基合金 (М-252、 乌斯伯洛依和尤吉美特 500)	300
4. 哈斯捷洛依型形变及铸造合金	303
第九章 钴基合金	309
1. 成分和处理特点	309
2. 形变合金	313
S-816、ЭИ416	313
G. 32	317
海依乃斯-司太立特 25 (L-605)	319
3. 铸造合金	321
维他立姆 (HS-21)	321
61 (HS-23)	323
6059 (HS-27)	325
422-19 (HS-30)	327
X-40 (HS-31)	329
L-251 (HS-36)	331
第十章 铬镍钴铁混合基合金	333
1. 成分和处理特点	333
2. 工业合金的特征	336
N-155、ЭИ673	336
耐火合金	341
S-590	345
第十一章 铁素体耐热钢	350
1. 铁素体钢的优点	350
2. 钼钒钢	355
3. 1.5% 铬钼钒钢	359
4. 2~3% 铬钼钒钢	366
5. 3% 铬钼钨钒钢	370
6. 演变的 12% 铬钢	376
参考文献	387

第一章

渦輪機制造用耐热材料的发展概况

耐热材料是现代技术的新成就之一。它的发展史是与在創立噴气航空技术中起革命性作用的燃气輪机分不开的。但是并不能认为,只是由于燃气輪机的出現而需要耐热材料,也不能說它是促进耐热合金冶金学发展的唯一因素。在燃气輪机出現前的二十年内,如果没有对用于动力、石油和化学工业的耐热材料所进行的深入研究,同时在第一次世界大战后不久,如果没有謝威納尔(Chevenard)^[1]和狄更逊(Dickenson)^[2]等对金属高温性能所进行的大量理論研究,那么噴气航空发动机所用的耐热材料就未必能获得如此卓越的成就。

1. 燃气輪机出現前耐热合金冶金学的成就

在第一次世界大战末到第二次世界大战初的二十年間,曾經解决过很多有关耐热合金的問題,其中:

- (1) 制定了在高温条件下工作的金属的机械强度和化学性能的評定标准;
- (2) 确定了各种金属和合金的使用温度范围;
- (3) 奠定了耐热合金合金化的理論基础和找到了至少在 500~550°C 高温載荷下长期工作的新材料。

在这些材料中,目前能在高温下广泛使用的主要有以下几种:

- (1) 低合金化的鉬鋼、鉻鉬鋼和鉻鉬鈳珠光体鋼。在固定式鍋爐汽輪機制造业的實踐中,知道这些鋼的出現与三十年代热力設備的蒸汽温度提高到 480~510°C 有关;

(2) 用鈦或鉬來穩定的、含鉬的 18-8 型鎳鉻奧氏體鋼。在簡單的奧氏體鋼中，這種鋼的高溫蠕變性能、抗晶間腐蝕性和抗脆性最好；

(3) ATV、Era ATV 和 ATV/Hoepla 型鎳鉻鐵合金（鎳 32~40%，鉻 10~15%，鎢 2.5~3.5%）。由於這種合金具有很高的化學穩定性、耐蝕性和抗晶間腐蝕性，所以戰前用來作為功率最大的汽輪機上前幾級葉片的材料；

(4) 含鎢的鎳鉻奧氏體鋼，其成分為 14:14:2（我國牌號 9H69）。這種鋼曾長期被認為是活塞式航空發動機中最好的閥門用鋼之一，在這鋼種上演變的由作者研究成的含鈦低碳鋼 9H123^[3]，用來製造在高溫高壓下工作的國產汽輪機葉片有良好的效果；

(5) 除奧氏體鋼以外的其他不銹耐熱鋼。其中含碳 0.35~0.65%，鉻 14~18%，鉬 1~2%（鎢 2~3%）的高合金化鉻鉬鋼，可以用來製造工作溫度為 500~550°C 的壓縮機中承受高載荷的零件（渦輪盤及葉片）^[4,5]。

必須指出，除鐵基以外的某些特殊合金在燃氣輪機製造方面也起了很大作用。這些合金的化學組成，在戰前已為人所共知，例如 80-20 型鎳鉻合金，因為具有很高的耐熱性和耐腐蝕性，所以早在本世紀初已被應用於電工儀表（用作電熱零件的材料）、食品工業（用作抗脂腐蝕材料）及其他方面^[6]。而且在此鎳鉻合金的基礎上，最近已研究成鎳木尼克合金和因科鎳爾 X 合金。在航空渦輪發動機製造業的發展中起巨大作用的另一種特殊合金——鈷基的維他立姆合金，也在 1930 年即煉製出來，並且在其他方面還用它作為鑲牙的材料^[7]。

在冶金理論方面，戰前就已獲得許多成就，促進了 1939~1945 年戰爭初期航空燃氣輪機的發展。例如，在三十年代初就已發現應用熱處理調質的含鉻和鈦的奧氏體鋼^[8]，然而在當時對這些鋼特有的高溫強度尚未作出判定。在洛恩（Rohn）的著作中^[9]，已經注意到熱處理對鎳基合金的作用。許多研究工作者對鈷基合金、鐵

鎳鉻和鉄鎳鉻鈷混合基合金等的高温强度进行了研究，他們也同樣証明合金在加入鋁、鈦和鈮后可以得到强化^[10]。

由于燃气輪机設計的严格要求，在确定合金的化学成分和生产工艺方面进行了大量的研究工作。除鉄基合金外，其他一些在动力机械制造中占有重要地位的专用合金并不要求具有特殊的物理性能和化学性能，而只要求材料本身在高温下能够承受很高的机械載荷。

图1表明現代燃气輪机出現前在耐热材料的机械性能方面所达到的水平，該图是由美国材料試驗学会和美国机械工程师协会^[11]发表的、并由阿林(Allen)^[10]編制的各种鋼和合金的蠕变强度資料。图中标有数字1的区域为珠光体鋼；2为X18H9和X18H9T类成分較简单的奥氏体鋼和合金；3为化学成分較复杂的奥氏体鋼和合金，它們除含鎳和鉻合金元素外，还含有鈷、鉬及其他强化元素。

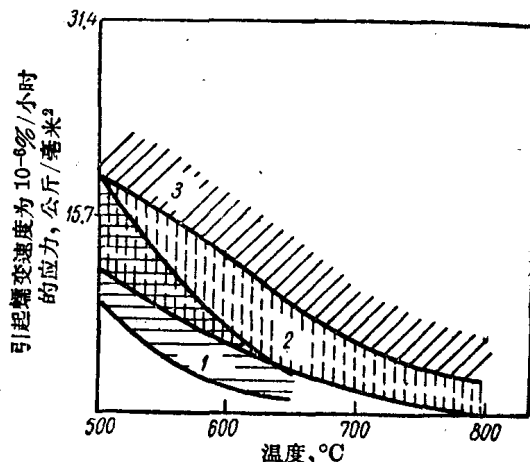


图1 各种鋼的蠕变强度(根据1938年的資料)^[10,11]

1—珠光体鋼；2—18-8型简单奥氏体鋼；3—化学成分較复杂的奥氏体鋼。

由此可見，1938年前珠光体鋼的蠕变强度(即引起蠕变速度为 $10^{-6}\%$ /小时的应力)在 500°C 时为 $8\sim 17$ 公斤/毫米²和在 650°C 时約为 1.5 公斤/毫米²。简单奥氏体鋼在 500°C 时，其蠕变

強度同珠光體鋼沒有差別，而在 650°C 時能承受約 4 公斤/毫米² 的應力，在 800°C 時能承受約 1.5 公斤/毫米² 的應力。成分較複雜的奧氏體鋼性能較好（圖 1 之 3），它們在 650°C 時能承受約 11 公斤/毫米² 的應力，但在 800°C 時並不比 X18H9 和 X18H9T 類的簡單奧氏體鋼有顯著的優越性。

2. 燃氣輪機出現後引起的耐熱材料的發展概況

三十年代中葉，在燃氣輪機設計方面獲得了巨大的成就，以致研究適用於在超高溫載荷下工作的材料問題，不僅是議事日程上的問題，而且成為決定這門先進技術能否得到進一步發展的基本課題之一。

因此，冶金工作是循着以下兩個方向進行的：第一個方向，也是其中主要的方向，即用作航空發動機的燃氣輪機材料要求在較高溫度下具有較高的持久強度和塑性變形等特點，而使用期限較短；第二個方向，是尋找固定式燃氣輪機裝置上高載荷零件的材料，同航空燃氣輪機材料相比，它的工作溫度較低，但使用期限很長。

目前，有些文獻指出^[10,12,13,14,15]，在 1939~1945 年戰爭以前，早已有許多國家開始製造軍用航空方面的渦輪噴氣式發動機。這些國家對製造燃氣輪機用耐熱材料的發展，各自有着自己的途徑。

德國 看來，德國是廣泛開展航空燃氣輪機用材料的研究工作的第一個國家。

從 1937~1938 年布倫拉特 (Bollenrath)、高涅列斯 (Cornelius) 和彭加爾特 (Bungardt) 所發表的資料中可以看出^[14,16,17]，德國人在當時已經從事極其複雜的合金研究（含鉻 10~18%，鎳 25~40%，鈷 20~35%，鎢 <8%，鉬 <8%，鈦 <3% 和鉭-鉍 2~8%），其成分和性能有很多地方與發展較遲的美國的鎳鉻、鎳鈷、鎳鉻鈷及鐵鎳鉻鈷基等超合金相同。

当时他们所研究的某些合金，其中如彭加尔特后期发表的 DVL42 或 PMWC 含钛合金(碳 0.1%，铬 13~15%，镍 30~35%，钴 25~30%，钨 4~5%，钼 5~6%，钛 1~2.5%，或钼-钨 4~5%)^[17]，至今尚未失去其价值。

在德国还同时进行了加钨、钼、钒、钛、铌等强化元素对奥氏体镍铬钢的影响的研究。根据这些研究的结果，在三十年代末由克虏伯公司炼制了铁镍杜尔(相当于我国[苏联]的 9H424 钢)，其成分为：碳 $\leq 0.15\%$ ，铬 14.5~15.5%，镍 29~31%，钛 1.5~1.8%。这是第一种具有良好性能的奥氏体钢，其良好的机械性能是由于加钛引起弥散硬化的结果。后来，因为德国缺少合金的情况日趋严重，该公司又炼制了一种蠕变性能比铁镍杜尔稍差的、用钒来强化的铬锰钢，叫做铬锰杜尔(碳 $\leq 0.12\%$ ，锰 17.5~18.5%，铬 11.5~12.5%，钒 0.6~0.7%，氮 0.18~0.23%)^[18,19]。

德国首批制造的喷气式发动机——BMW 003、容克 004 和汉克 011——可在 550~600°C 高温下工作，当起飞启动及加大功率时可增高至 750°C，受载荷连续工作时间在 100 小时以内^[14]。德国航空燃气轮机叶片中所能承受的最高温度和最大应力为：容克 004 发动机—14 公斤/毫米²，600°C；BMW 003—16 公斤/毫米²，550°C；汉克 011—18 公斤/毫米²，600°C^[13]。

后来，这些原始条件有了一些改变。为了大力节省稀缺元素，德国人在战时制造涡轮叶片时，不得不采用铁镍杜尔、铬锰杜尔及与此近似的含铬 18%、镍 8~15% 和含少量强化元素钼和钨的奥氏体钢，而当钼和钨也成为稀缺元素时，则使用钒和钛作为强化元素。德国在战时生产的所有牌号的钢中几乎都不含有铌^[20]。

由图 2 可以看出德国制造的奥氏体钢的蠕变强度，图中区域 1 为奥氏体镍铬钢，2 为奥氏体铬锰钢(铬锰杜尔)。由此可见，对于当时德国的燃气轮机来说，在温度高于 700°C 时多少还能够连续工作一段时期，这些材料的耐热性是不大的。

为了更进一步节省合金元素，德国人在选择燃气轮机涡轮盘材料方面也进行了工作。起初企图采用铁镍杜尔，后来一方面由

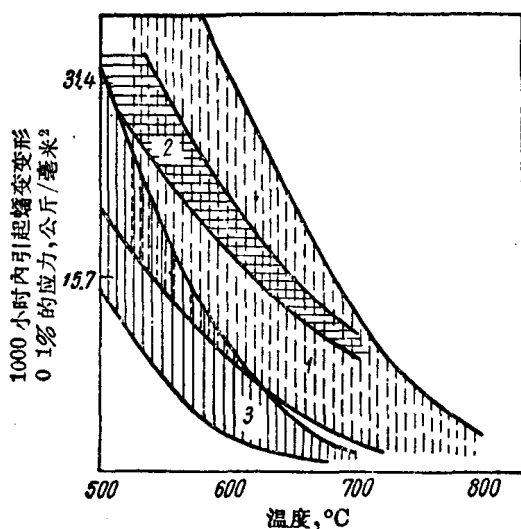


图2 德国制造的奥氏体钢的蠕变强度^[10]

1—奥氏体镍铬钢；2—奥氏体铬锰钢；3—珠光体钢

于这种材料在锻造上有困难，一方面在材料结构方面又出现了可以用冷却转子的方法使轮缘的温度降低到 550°C 的情况，因此就创造了采用珠光体钢制造涡轮盘的可能性。

德国冶金工作者曾最先采用 3% 的铬钼钨钢或铬钼钨钢 (德国牌号 FKDM10 和 FKM10, 我国牌号 3M415) 制造燃气轮机冷却式转子, 后来这些钢材的性能也被其他各国所推崇。

德国人通过自己的研究, 明确了金属的组织、结构及热处理工艺对含钨的珠光体钢蠕变强度的作用后, 曾采用适当的热处理条件使同一种材料的蠕变强度和持久强度提高 25~30%, 因而大大提高了材料的使用温度界限。从图 2 (区域 3——珠光体钢) 中可以看出, 在这些条件下优良的珠光体钢可与某些简单的奥氏体钢相媲美。

但是德国在战时即使是制造这些含稀缺元素极少的低合金材料, 也还由于缺乏钨和钨而遇到许多困难。有过报导^[15], 在战争末期德国曾用铬钼和钨钢来代替铬钼钨和铬钼钨钢, 虽然前

者的耐热性不及后者，但是用于德国噴气机中尚能满足短时期工作的要求。对于德国冶金工作者在耐热材料这门科学的发展中所作的贡献，应給以公正评价，这一点，可以同意美国一位評論家所发表的意見^[21]，即德国燃气輪机材料性能上的缺点在很大程度上已被德国燃气輪机的精巧結構所补偿。

英国 英国燃气輪机材料的发展情况与德国有所不同。最初，他們把研究力量集中在詳細地钻研少数的材料上面，直到后期，英国仍然有这种倾向。英国的耐热材料始終是有限的几种合金。由于其中每一种合金都經过大量实验，因此使用时較有把握，性能也十分可靠^[10]。

英国人在探索奥氏体鎳鉻鋼方面取得成功后，才开始发展噴气技术的工作。1936年制造的第一台維脫尔型发动机中的叶片和渦輪盘，就是采用佛尔斯-威克斯公司冶炼的司太伯立特(Stayblade)鋼制成的^[12]。这种鋼由試制汽輪机时炼成的司太伯萊脫(Staybrite)鋼(碳 0.12%，鉻 18%，鎳 8% 和鈦 0.6%)发展而成，在 20°C 时，屈服强度較高，并且由于含鈦量高(1.2%)和經过專門的热处理，在 600°C 以下具有較好的蠕变性能。

但是，在維脫尔型发动机中，司太伯立特鋼仅仅在 550°C 以下时才能保持不产生显著的蠕变变形和应力破坏的情况^[12]。因此它很快就被哈脫菲立特公司炼成的萊克斯 78 (Rex 78) 鋼(碳 0.1%，鉻 14%，鎳 18%，鉬 4%，鈦 0.6%，銅 4%，鈳 0.25%)所代替^[22]，这种鋼是英制奥氏体鋼中最早采用弥散硬化(热处理調质)的鋼种。它的机械性能和蠕变强度虽未完全满足，但已接近維脫尔型发动机設計师們的基本要求——在 1000 小时內，650°C 下，当应力达到 18.3~21.1 公斤/毫米²时不发生断裂破坏。

但是，这种金属的质量与当时所有的其他奥氏体鋼一样(图 3 中区域 1)，不能满足功率較大的发动机的要求。虽然后来英国人在提高奥氏体鋼的耐热性方面获得了很大成就，以萊克斯 78 和閥門鋼 G.2(与我国牌号 2H69 相近)为基础，炼成了直到現在仍用作

燃氣輪機葉片材料的萊克斯 337^① 和 G.18B 合金，但是英國的燃氣輪機製造業在戰時所以獲得進一步發展，却是因為找到了另一種葉片材料。這種材料即是經過彌散硬化的鎳木尼克型鎳基合金。它創立了發展耐熱合金冶金術的新紀元，直到今天雖然在形式上經過多次演變，但是這種材料在作為英國燃氣輪機葉片的标准材料方面還保持着它的價值^[23]。

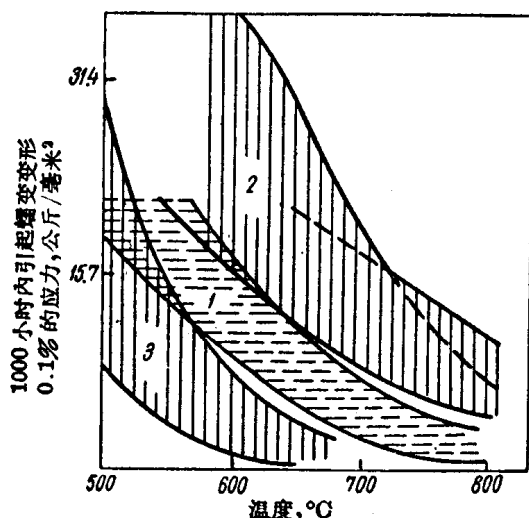


圖 3 戰前和戰後英制耐熱合金的蠕變強度^[10]

1—早期製造的奧氏體鋼；2—後期製造的奧氏體鋼和合金；3—珠光體鋼

這種合金的第一種——鎳木尼克 (Nimonic) 75^②——是由 80-20 鎳鉻合金稍作改變而得來的，所不同者在於鎳木尼克 75 的含碳量較低 (0.1%) 和含有少量的鈦 (0.3%)。它並不用作工作葉片的材料，然而長期以來卻把它用作製造英國航空渦輪的導向葉片和燃燒室的材料^[6, 24]。

試驗研究證明，在適當的熱處理規範配合下，碳和鈦的含量對合金的高溫機械強度具有特殊的作用。英國蒙特利鎳公司在鎳鉻

① 這種鋼的化學成分和本章內提到的其他鋼種的化學成分，詳見書中第六章至第十一章的各表。

② 我國牌號 3H435 (XH78T)。