

[美] C. T. 西姆斯 等著  
赵 杰 等译



# 高 温 合 金

——宇航和工业动力用的高温材料

大连理工大学出版社

# 高温合金

——宇航和工业动力用的高温材料

[美] C. T. 西姆斯 N. S. 斯特劳夫 W. C. 黑格尔

赵杰 朱世杰 译  
李晓刚 王富岗  
王华明 等校

大连理工大学出版社

(辽)新登字 16 号

## 内 容 简 介

本书是关于高温合金方面的一本综合性著作。书中不仅系统地介绍了高温合金强化基础,镍基、钴基和铁基高温合金的物理冶金和力学冶金,而且还特别强调了高温合金的新进展如定向凝固和单晶高温合金,同时还介绍了高温合金氧化、热腐蚀和涂层技术以及熔炼和加工工艺、粉末冶金工艺、熔模铸造和焊接技术,最后还介绍了金属间化合物、复合材料、难熔金属和陶瓷材料以及高温合金的发展前景。

本书适合于高温合金生产,高温装置设计、管理和控制等工程技术人员阅读,亦可供大专院校的大学生、研究生以及研究部门的科研人员参考。

C. T. Sims N. S. Stoloff W. C. Hagel

### Superalloys I

—high temperature materials for  
aerospace and industrial power

本书根据 John Wiley & Sons, Inc. New York 1987 年版翻译

## 高 温 合 金

——宇航和工业动力用的高温材料

Gaowen Hejin

赵杰等译 王华明等校

---

大连理工大学出版社出版发行

(邮政编码·116024)

大连海运学院印刷厂印刷

---

开本:787×1092 1/16

印张:25.25

字数:624千字

1992年2月第1版

1992年2月第1次印刷

印数:1-1000

---

责任编辑:杨 泳

封面设计:姜严军

责任校对:王 董

---

ISBN 7-5611-0546-0/TG·6

定价:19.50元

## 译者的话

本书的翻译和出版实现了已故大连理工大学曹智本教授生前的夙愿。

在翻译过程中,得到了中国科学院学部委员师昌绪先生的热心支持,他在百忙中抽出时间为本书写了序,在此深表谢意。

中国科学院金属研究所胡壮麒研究员和北京科技大学谢锡善教授对翻译工作给予多方面指导,并且校正了前言和原序的译稿,在此深表感谢。

参加本书校正工作的还有中国科学院腐蚀与防护研究所陈全芳博士,金属研究所谭若兵博士、朱洪群博士,田德蔚博士、孙正明博士和陈梅博士,在此一并表示感谢。

敬请读者对译文中不足之处批评指正。

译者

1991年5月

## 译序

高温合金起源于 40 年代的军用飞机的需要,目前已成为军用和民用高温燃气轮机不可代用的一类关键性材料,从而对推动人类文明进步起到十分重要的作用。没有能在高温高强度、长期(几万小时)、安全可靠工作的高温合金,就不可能有今天的航空事业。由于其耐高温、保证了发动机的高效率,使发动机的油耗不致过高,续航时间可达十几小时而不着陆;由于其长期安全可靠,才使现代飞机的失效率下降到最低限度,使人们不因乘飞机而感到身危,从而大大地提高了人类的工作效率和文化交流。高温燃气轮机的另一作用是用做动力装置,它具有效率高、机动性强等特点,也是现代能源和运输业不可缺少的。作为高温燃气轮机所用高温合金又有不同要求,除了高温高强度、安全长寿命以外,还要求很强的抗腐蚀能力。军用飞机的发展更是日新月异,发动机用高温合金所占比例已达一半左右,而且对合金性能的要求,除了高温高强度与安全可靠以外,还对比强度与比刚度有更高的要求。此外,高温合金在核工业、宇航工业等方面都占有一定的位置。因此,世界各军事大国及某些工业发达国家都把高温合金的发展列为重要战略地位。国际高温合金学术讨论会在美国和欧洲不断召开,以推动高温合金的不断发展。高温合金专著也层出不穷,本书《高温合金》(Superalloys I)(1987 年出版)便是其中之一,它是继《高温合金》(1972 年出版)的另一本具有权威性的专著,本书作者包括了美国高温合金界的许多权威人士,有的来自研究机构和大学,有的来自生产第一线,还有不少是合金使用部门的管理人员,他们对高温合金的应用前景和存在的问题有更多的发言权。所以本书很值得我国高温合金工作者一读,以系统地了解现代高温合金的基础知识和世界高温合金的现状。由于历史的原因,虽然我国从事高温合金研究、开发与生产的科学技术队伍不小,但是其中的多数人对外文还不那么熟悉,至少不如读中文流畅,因此,将本书译为中文是很有意义的。为了使年青读者对我国高温合金的发展有所了解,我在这里谨将我国高温合金的发展过程简述如下,也算是对本书第一章(高温合金——起源和特性)的补充。

我国喷气发动机的问世是在 1955 年,次年便开始了发动机所用最简单的镍基高温合金的试制工作,那就是板材合金 ЭИ435(即 Nimonic75,后来我国编号 GH30),但是,那时的试制工作并没有真正开展起来,只做了一些尝试而已。我国大规模的研制工作是在 50 年代末。1958 年的“大跃进”虽然有不少副作用,但对我国高温合金的发展来说,却创造了一个很好的机会。当时航空界提出设计和制造一台高性能的飞机,对材料提出了很高的要求,从而带动了我国高温合金的发展。当时中国科学院金属研究所、冶金工业部钢铁研究总院和航空工业部航空材料研究所(三机部六所)等单位都相继投入了“战斗”,当时金属研究所拥有我国第一台 5 公斤真空感应炉,开展了真空精密铸造涡轮叶片的研制,发展出我国第一个性能处于当时国际水平的、无钴镍基铸造高温合金(916),但由于发动机厂不具备生产条件,而没能得到推广。与此同时,有更多的单位研制出性能比 ЭИ929(GH49)(当时代表变形合金的最高水平)更高的变形高温合金,如北京钢铁研究总院的 511,金属研究所的 539 等。在研制过程中带动了我国压力加工的发展,如包套挤压、包套轧制等,利用这些特种加工技术使很难变形的合金锭有较高的成材率。这些合金虽然具有很高的耐高温强度,但其工艺性能不够理想而没有得到推广。当时我国受到国外的封锁十分严重,镍铬来源几乎断绝,而国内镍矿还没有得到开采,于是提出了以铁基

代镍基高温合金的发展方针。在这种思想指导下,金属所与抚顺钢厂首先开发出与ЭИ4375性能相近的铁基合金808(GH135),但做成涡轮叶片试车未能成功,而改用做涡轮盘合金,曾以千计的盘坯用于不同机种。808铁基合金的研制与推广,带动了我国真空冶炼与冷加工工艺的发展;北京钢铁研究总院与上海钢研所分别发展出ЭИ617性能相当的铁基合金红星5号与302合金,虽然在航空上没有得到应用,但作为增压器等材料却流传于世;航空材料研究所研制出代ЭИ435的铁基合金G22,作为板材得到广泛应用。70年代,金属研究所又研制出屈服强度接近Inconel718的761铁基合金,作为盘材的使用温度可达700℃以上,比718至少高出50℃,虽然还未能大量推广,但有光明前景。

在整个发展过程中,我国在仿制国外已有牌号的合金,或稍加修改而明显提高已有合金性能的工作中,曾做过很大努力,如1959年中苏关系恶化以后,我国喷气发动机用的高温合金的供应几乎陷于绝境,以冶金部钢研院和抚顺钢厂、上海五厂、大冶钢厂与齐齐哈尔钢厂为主,中科院金属所与三机部六所参加共同攻关,经过几年的艰苦奋斗,所有仿苏牌号的合金的生产全部立足国内。另外,从欧美也引进了几种不同型号的航空发动机及工业燃气轮机,其所用高温合金的生产也基本立足国内,再加上我国自行研制的合金新品种,总计达80余个牌号,形成了我国的高温合金体系。目前,高温合金形成体系的国家只有美、苏、英,我国是第四个,而且,我国高温合金的生产能力也不小,特别是有一支经验丰富的科技专业队伍,这是我国高温合金不断发展的保证。从目前来看,世界高温合金研究工作的各前沿领域,我国或多或少地都在进行着,如定向凝固、单晶叶片、快速凝固及粉末冶金、氧化物弥散强化(ODS)合金,以及最近高温合金研究的热点——金属间化合物等。

我国高温合金也有自己的特点,主要表现在:第一,我国在高温合金的冶炼方面,充分发挥了电渣重熔的特点,成本低,夹杂物少。第二,为了解决我国锻造能力的不足,在60年代创造的电渣熔铸涡轮盘新工艺,在国际上是一创举,虽然实际上并没有形成大规模生产,但已通过试车试飞的考验,证明这一工艺是可行的,只是在质量控制与检测方法上还需要进一步研究。第三,60年代中期我国自行研制出铸造高温合金多孔空心涡轮叶片,难度很大,在国际上仅落后于美国几年。第四,我国对高温合金中的微量元素作用的研究,做出了不少出色的工作,曾得到国际上好评。特别是发现了某些微量元素对高温合金的偏析有十分重要作用,这是一项有创造性的工作。通过偏析的降低,可进一步提高合金元素的含量。从而使铸造合金的工作温度可提高25℃左右;由于偏析的降低,可扩大合金的锭型,从而提高生产率;由于偏析的降低,可大幅度提高合金的初熔温度,从而扩大合金的锻造温度范围,减少抗力,有利于精密成型;由于偏析的降低,对定向凝固合金可不加铪,而仍保持其较高的横向高温强度,等等。这可能是几十年来我国对高温合金发展的一个重要贡献。

上述情况,不够全面,可能有更重要的成果没有包括进来,仅供读者参考。

邵昌绪

1991.1.21.

## 前言

在过去的许多年里,已经出现了许多高温合金的定义。在我们看来,高温合金是以第八主族元素为基体,为高温使用而研制的合金。它们具有机械强度和表面稳定性的良好配合。高温合金研制的发展使得推重比不断增长的现代喷气发动机的出现成为可能。同样,高温合金在工业燃气轮机、煤的能量转化工厂和其它高温及恶劣环境条件下应用的装置中起着极其重要的作用。

1972年出版的《高温合金》一书是第一本综合性的专著并且很快成为这一领域的典型参考书。尽管当时它没作为教科书来编写,但它还是在一些大学课程中作为教材来使用。这一领域中的28位权威人士编写了20章,同时还以附录的形式汇集了许多高温合金相图、力学性能和化学成分。这本书尽管很成功,但是,近年来高温合金的熔炼技术、合金发展和生产工艺的进展非常快,这就迫切需要对该书进行修订。虽然最近几年出版了一些很好的书,但在内容上还没有像《高温合金》这本书这样广泛和综合。

因此,早在1985年编者就决定要写一本新书,在形式上与过去的版本基本相同,但特别强调新的发展——诸如粉末冶金的发展,定向凝固和单晶高温合金的涌现等等。在本书中,许多章节已经重写(有的作者与过去不同),而有些章节则进行了大量的修改(如“强化基础”,“镍基合金”),也有几乎没变动的(如“焊接”)。由于目前的高温合金已在其绝对熔化温度的90%下使用,所以燃气轮机技术的进一步发展又待于新材料的出现,例如陶瓷材料,难熔金属(铌),复合材料和金属间化合物。因此本书中专门有一章叙述关于有可能替换高温合金的新高温材料。相反地,我们删掉了关于“机械加工”一章和关于“铬合金”一章。为了有利于材料工程师们掌握高温合金领域较完整的知识,又加入燃气轮机设计及高温合金这新的一章。

像第一版原著一样,物理冶金方面的各章都旨在提供了解高温合金系中某一领域内所需要的科学和技术知识。本书专门用一章来讨论定向凝固,而另一章论述锻造合金,以强调新工艺技术的快速发展和不断涌现。

为了适应世界各国的读者,本书整个正文和大部分图表采用两种单位制(英制和SI制<sup>①</sup>)。先列出英制以便适应于美国高温合金工业目前的实际情况。我们希望国外和高等院校的读者不要觉得这种安排太扫兴。此外,我们还要指出,尽管各章的作者都来自美国,但本书并不缺少日本、西欧和苏联高温合金的研究、发展和应用方面的内容。特别是欧洲共同体的COST50和COST501项目是这一领域欧洲活跃的研究工作的典例。

我们建议读者使用本书与定期在美国七泉城(Seven Springs)召开的高温合金会议论文集和在比利时召开的COST会议论文集结合起来,以便全面地了解高温合金工业和商用现状。

为了改进可阅读性,本书尽可能减少数学公式。此外,我们相信,本书将会继续作为高温合金方面的学校课程和短期强化课程的教材。注册的高温合金牌号都列在附录C中。

<sup>①</sup> 译文中尽可能采用SI制——译者注。

编者特别感谢那些作出贡献的作者,感谢他们为各章节花费许多时间和努力。我们还感谢一些同事的奉献,他们帮助校对、评阅和为作者提供材料。

C. T. 西姆斯(Smis) 纽约州,特洛伊城  
N. S. 斯特劳夫(Stoloff)  
W. C. 黑格尔(Hagel) 密执安州,安阿伯城

1986年10月



## 序

在第二次世界大战中,德国和英国军队首批成功地使用的以喷气发动机为动力的飞机,是由受材料限制的性能相对较差的发动机制成的。随着喷气飞机的进步,喷气发动机仍继续受材料的制约。然而,回顾自 1942 年以来所取得的材料进展,向我们展示了一系列惊人的发展,由于这些发展而使工作温度和工作应力从未停止过升高。这些发展或着重于工艺或侧重于合金,而且经常是两者兼之。结果,发动机推力从 1942 年 Whittle 发动机的 363 公斤(800 磅)提高到目前 29 477.5 公斤(65 000 磅)的水平——在 40 年多一点的时间内提高了 80 倍。

最初,钴基合金是制造叶片的先导材料,而铁基合金则服役于较低温度下使用的部件(例如涡轮盘)。传统工艺经过或多或少的改进后,像 S-816 这样的锻造合金就为粗晶精密铸造钴基合金让了路。这样一来,产业部门学会了如何控制晶粒尺寸和组织,设计人员学会了该怎样使用延性不理想的材料,而材料的使用温度则升到了 815 °C。无论当时还是现在,精密铸件都将继续在高温合金领域中扮演统率作用的角色。

与此同时,在非常重要的适应性很强且在目前应用中占统治地位的  $\gamma/\gamma'$  强化的镍基合金方面,也进行着并行的开发工作,它借助于真空冶金工艺的进步而控制杂质的水平,使合金化程度很高的高强度合金的生产成为可能。这样,通过各种专门熔炼工艺的发展(其中真空电弧熔炼最为杰出),使合金含量更高因而强度和温度潜力更高的合金成为现实。

为了说明并评价合金成分和组织的作用,为了利用先前认为不可能达到的合金纯度水平的优点以及为了解决某些特殊问题而开发各种先进的技术来改进合金组织与化学成分,这些发展要求研究和开发非并行地进行。这样,最终发展起来了激动人心的定向凝固及单晶涡轮叶片,其中单晶叶片最近才在发动机上应用。

在这整个时期中,冶金学家、设计人员和制造厂商一直担心的问题是,镍基及钴基合金最终可能不得不得被熔点更高的难熔金属合金所取代。这是不足为怪的,因为,一方面合金化程度的提高要使合金的熔点降低,而另一方面人们又要求合金的使用温度占合金熔点的百分数愈来愈高!

最初,主要努力侧重于钼及铌合金的开发上,这些合金未能成功地实现当时计划的工作温度与预期的使用寿命。但是,若能找到合适的涂层的话,它们在高于大约 1100 °C 以上的温度下仍将具有应用前景。虽然这些合金已经达到了很高的强度水平并开发了某些很有前途的涂层,但它们却仍未达到预期的使用寿命。后来,铬基合金看起来将成为一个明显可望获得成功的合金,但由于其脆性问题,终究也没有获得成功。

我们还必须提到有关金属陶瓷的早期尝试和 50 年代以来一系列陶瓷时代发展的首批研究工作,这两类材料都具有令人感兴趣的紧密结构,但它们也仍没有在与高温合金的竞争中得到应用。奥氏体高温合金仍继续占支配地位。

借助于快速凝固能对杂质偏析与所期望的组织进行更为严格的控制,人们正在开发和研究更为复杂的合金。此外,粉末冶金学领域中超细晶粒尺寸与组织的产生,使超塑性易于获得和利用。像 IN-100 和 Mar-M509 这样的铸造合金在低温及中温条件下具有非常高的强度且易于成形为复杂的形状,包括精成形。在 60 年代,有谁会预料到铸造合金 IN-100 会处理得具有

超塑性并成为在大约 650~700℃ 温度下应用的涡轮盘候选材料呢? 超塑性组织可望对高温合金工艺产生较重大的冲击。

最后, 我们正注视着氧化物弥散强化(ODS)合金的重要应用, 氧化物弥散强化合金又一次综合应用了这些年来发展起来的各种工艺与合金化技术。利用机械合金化与现代快速凝固工艺(细小的完全合金化了的粉末), 将使氧化物弥散强化镍基和钴基合金的使用温度超过 1100℃。

熔点低于 1400℃ 的合金可以用在 1100℃ 或更高的温度条件下吗? 使用温度可以超过合金绝对熔化温度的 80% 吗? 是的, 这一时代已经到来, 采用金属基复合材料, 其使用温度占熔化温度的百分数甚至还会更高。

总而言之, 各种合金化工艺与合金成分和组织之间的极为有效的相互作用, 再加上人们在组织、性能和稳定性方面有力的科学研究工作, 已使高温合金处于现在这样的一种工程地位, 这种地位是高温合金早期提议者所绝对不可能想像得到的。

《高温合金》这本书是利用高温合金这一工业成就并使之永存的一个非常重要的部分, 特别是在寻找高温合金的替代合金和材料但还未找到的时代。《高温合金》的要旨也应该成为某些正在研究的用以取代或抛弃高温合金的新材料的典范。

N. J. 格兰特(Grant)  
麻省理工学院  
材料科学与工程系教授

# 目 录

译者的话

译序

前言

序

<b>第一篇 概述</b> .....	1
<b>第一章 高温合金:起源和特性</b> .....	1
第一节 背景和应用.....	1
第二节 技术的发展.....	4
第三节 材料性能研究进展.....	8
第四节 工艺的发展 .....	13
第五节 灾难——问题分析 .....	16
第六节 总结:高温合金发展主要技术年表.....	16
参考文献 .....	17
<b>第二章 燃气轮机设计和高温合金</b> .....	18
第一节 热机:发展高温合金的动力.....	18
第二节 燃气轮机部件和工作环境 .....	21
第三节 材料性能模型 .....	24
第四节 多轴应力状态和各向异性 .....	33
第五节 材料性能的统计表示法 .....	34
第六节 总结 .....	35
参考文献 .....	36
<b>第二篇 基本的合金系</b> .....	37
<b>第三章 强化基础</b> .....	37
第一节 拉伸性能 .....	37
第二节 镍基合金的沉淀强化 .....	40
第三节 弥散强化合金 .....	48
第四节 模型的评价 .....	49
第五节 钴基合金的沉淀强化 .....	53
第六节 蠕变机制 .....	53
第七节 总结:强化机制和合金设计.....	56
参考文献 .....	59
<b>第四章 镍基合金</b> .....	61
第一节 化学成分 .....	61
第二节 结构和显微组织 .....	62

第三节	相的组成、结构和反应	63
第四节	$\gamma$ 基体	63
第五节	$\gamma'$ 相	65
第六节	碳化物	70
第七节	硼化物	74
第八节	拓扑密排(TCP)相	74
第九节	相稳定性和温度	74
第十节	晶粒和晶界的影响	75
第十一节	铪	77
第十二节	晶界结构	77
第十三节	热处理	78
第十四节	变形合金	78
第十五节	铸造合金	80
第十六节	铸造镍基合金的定向凝固	82
第十七节	总结:强度的改进	83
	参考文献	84
第五章	钴基合金	86
第一节	化学成分	86
第二节	合金相	89
第三节	几何密排(GCP)相	94
第四节	拓扑密排(TCP)相	95
第五节	合金的显微组织和热处理	96
第六节	力学性能和强化机制	102
	参考文献	105
第六章	镍-铁基合金	106
第一节	发展史	106
第二节	合金和合金类型	107
第三节	成分、组织和相关关系	108
第四节	物理冶金	110
第五节	工艺对组织和性能的影响	119
第六节	最近和未来的发展	121
	参考文献	121
第七章	定向凝固高温合金	123
第一节	定向凝固工艺	124
第二节	显微组织	126
第三节	热处理	128
第四节	合金设计	130
第五节	力学性能	132
第六节	氧化-热腐蚀	138

第七节 未来的发展方向·····	138
参考文献·····	138
<b>第三篇 合金系的性能·····</b>	<b>140</b>
第八章 相成分的预测·····	140
第一节 相关系·····	140
第二节 拓扑密排(TCP)相的显微结构·····	142
第三节 对力学性能的影响·····	143
第四节 电子空位数·····	146
第五节 电子空位理论与合金相的关系·····	148
第六节 高温合金电子空位计算(PHACOMP)·····	148
第七节 PHACOMP 法在工业上的应用·····	151
第八节 PHACOMP 法存在的问题·····	151
第九节 在铁基和钴基奥氏体合金中的相计算·····	153
参考文献·····	154
第九章 力学性能·····	156
第一节 高温合金在较低温度下的性能·····	156
第二节 高温合金在中温下的性能·····	160
第三节 高温合金在高温下的性能·····	164
参考文献·····	168
第十章 疲劳·····	169
第一节 循环变形·····	169
第二节 裂纹萌生·····	173
第三节 裂纹扩展·····	180
第四节 未来的研究工作·····	184
参考文献·····	184
<b>第四篇 表面稳定性·····</b>	<b>187</b>
第十一章 高温氧化·····	187
第一节 合金氧化的基本原理·····	187
第二节 M-Gr 合金的氧化(形成 $Cr_2O_3$ )·····	189
第三节 形成 $Al_2O_3$ 的材料系;涂层合金·····	191
第四节 其它常见合金化元素的影响·····	198
第五节 复杂的镍基高温合金·····	199
参考文献·····	206
第十二章 热腐蚀·····	209
第一节 工作和试验条件的影响·····	209
第二节 热腐蚀退化·····	211
第三节 热腐蚀的初始阶段·····	213
第四节 热腐蚀的增长模式·····	216
第五节 各种元素对热腐蚀过程的影响·····	222

第六节	某些高温合金热腐蚀破坏的比较	226
第七节	改善高温合金热腐蚀抗力的展望	226
	参考文献	227
第十三章	防护涂层	229
第一节	涂覆工艺	229
第二节	涂层评价	234
第三节	涂层使用性能	234
第四节	热障涂层	242
第五节	总结	244
	参考文献	245
<b>第五篇</b>	<b>工艺冶金</b>	<b>246</b>
第十四章	熔炼和精炼	246
第一节	背景	246
第二节	初级熔炼工艺	247
第三节	重熔和精炼工艺	250
第四节	目前和未来的发展趋势	258
第五节	总结	259
	参考文献	259
第十五章	熔模铸造	261
第一节	基本工艺	262
第二节	模型	263
第三节	陶瓷型芯	264
第四节	壳型系统	265
第五节	铸造工程	266
第六节	铸造工艺	270
第七节	未来发展	277
	参考文献	279
第十六章	锻造合金	280
第一节	目前的工业用金属加工工艺	281
第二节	需要确定的工艺参数	284
第三节	未来十年展望	288
	参考文献	289
第十七章	粉末冶金	291
第一节	粉末制备工艺	292
第二节	粉末固结	300
第三节	热机械处理	302
第四节	力学性能	303
第五节	未来的工作和总结	312
	参考文献	313

第十八章	焊接	314
第一节	焊接的优点	314
第二节	与焊接相关的问题	314
第三节	焊接工艺	315
第四节	焊接的自动化	316
第五节	焊接接头的描述	317
第六节	快速热循环	317
第七节	开裂敏感性的测定	318
第八节	热塑性试验	319
第九节	微量元素的影响	324
第十节	$\gamma'$ 强化合金	324
第十一节	总结	327
	参考文献	327
<b>第六篇</b>	<b>展望未来</b>	<b>329</b>
第十九章	替代材料	329
第一节	金属间化合物	329
第二节	复合材料	334
第三节	难熔金属	336
第四节	陶瓷	341
第五节	总结	345
	参考文献	346
第二十章	高温合金的未来	348
第一节	合金的发展	349
第二节	超净金属	351
第三节	微量和痕量元素	352
第四节	高温合金中的钴	352
第五节	钴基合金	352
第六节	氧化物弥散强化(ODS)合金	352
第七节	涂层和涂层合金的开发	353
第八节	工艺开发	353
第九节	竞争的材料系	354
第十节	总结	355
	参考文献	356
附录 A	相图	357
附录 B	高温合金数据	366
附录 C	注册商标	381
	合金索引	382
	作者索引	384

# 第一篇 概述

## 第一章 高温合金:起源和特性

C. T. Sims

高温合金是很难与其它合金划出明确界限的一类材料。在1972年出版的《高温合金》一书中<sup>[1]</sup>所下的定义证明是较为令人满意的:“高温合金通常是以第Ⅷ主族元素为基,为在承受相当严酷的机械应力和常常要求具有良好表面稳定性的环境下进行高温服役,而研制的一种合金。”

高温合金分为三类:镍基高温合金、钴基高温合金和铁基高温合金。此外,还有一个主要分支,其冶金学特点类似于镍基合金,但含相当多的铁,称为镍-铁基高温合金。

与其它种类的大量工业冶金材料相比,高温合金被应用在更接近于其实际熔点温度下。使当今许多高温工程技术成为可能的高温合金是驱动喷气式飞机的燃气涡轮机的前沿材料。而这些发动机又正是高温合金存在的主要动力。高温合金除应用于航空、航海、工业和车辆运输的燃气涡轮机外,还应用于航天器、火箭发动机、核反应堆、潜艇、火力发电厂和石油化工设备。研制的许多(约15~20%)高温合金应用于抗腐蚀物件。虽然本书主要针对于在高温条件下应用的高温合金,但这里的许多知识可应用于腐蚀条件下服役的高温合金;这些合金在后面将做简单的介绍。

本章试图叙述高温合金的发展历史。部分地打算对其性能和制造进行在技术上和科学上有用的、依年代先后的分析,并且还将对主要的性能指标和产生这些特殊并且重要材料的外因进行评价。同时,对高温合金应用和经济价值也提出一些感受。但最重要的是作为后续章节的引言和背景。

### 第一节 背景和应用

#### 一、机械装置

纵观历史,人类研制了多种机械装置以满足他们的需求。数百年前,也许从观察到上升热空气的动力开始〔图1-1(a)〕,人们明白了做有用功的效率与高温的利用相关。随后,在热力学上产生了Brayton循环,它坚持的一条基本物理原则是,工作温度越高(伴随较低的热损失温度),效率越高(见第二章)。

Brayton的概念被应用于旋转式发动机,而在19世纪开始出现了相当先进的蒸汽涡轮机。20世纪初,燃气涡轮机在欧洲被用于发电。图1-1(b)示出了挪威Aegidius Elling<sup>[2]</sup>设计的第一台成功的燃气涡轮机。在19世纪末20世纪初,发明家的工作进展很快,基本上与涡轮发动机动力装置相平行,研制出了汽油发动机和螺旋桨推动式有翼飞行器。



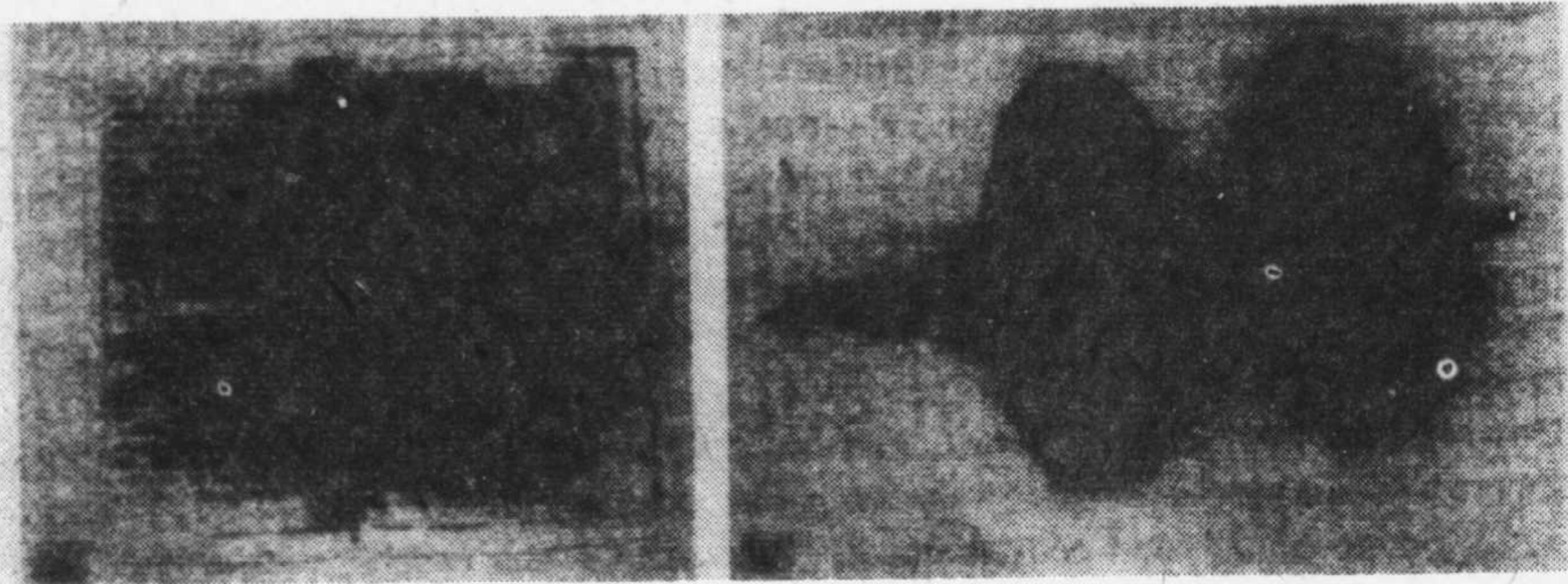


图 1-1 燃气涡轮发动机的起源

(a)仿照 1648 年 Bishop Gibbons(7)的“数学魔术”、对家庭作坊有用的第一台燃气涡轮机；  
 (b)1923 年 Aegidius Elling(2)设计的第一台工业上成功的燃气涡轮机的转子。

在发动机研制的最初 10 年中,人们认识到,由于在飞行高度空气压力较低,所以飞机需要某种装置给内燃机提供压缩的空气-燃料混合气。这方面工作在欧洲和美国取得了进展。美国康乃尔大学的 Sanford Moss、通用电气公司和美国陆军的共同努力,最终研制出飞机涡轮增压器。这一发明推动了金属合金的不断改进,最后使美国在高温冶金领域中占据领先地位。

随后,出现了一个非常重要的科技现象。空气动力学理论的进展使英国、德国和意大利设计者的思想发生了根本的变化:(a)认识到涡轮牵引消耗掉施加于传统飞机的动力的三分之二;(b)将包括上升力(lift)概念的 Prandtl 机翼理论应用于轴流式压缩机和涡轮机;(c)搞清了螺旋桨端部超音速力使飞机不能超过 640km/h 的速度。这三方面因素一起导致了一个新的技术名词,即喷气发动机为动力的飞机。这是一次革命,而不是改进<sup>(3~6)</sup>。

随着德国 Hans von Ohain 的涡轮发动机 Heinkel 1937 年的飞行〔图 1-2(a)〕和独立研制的英国 Whittle 发动机 1939 年飞行〔图 1-2(b)〕,喷气式飞机被人们广泛了解。图 1-3 概括出一些重要事件。

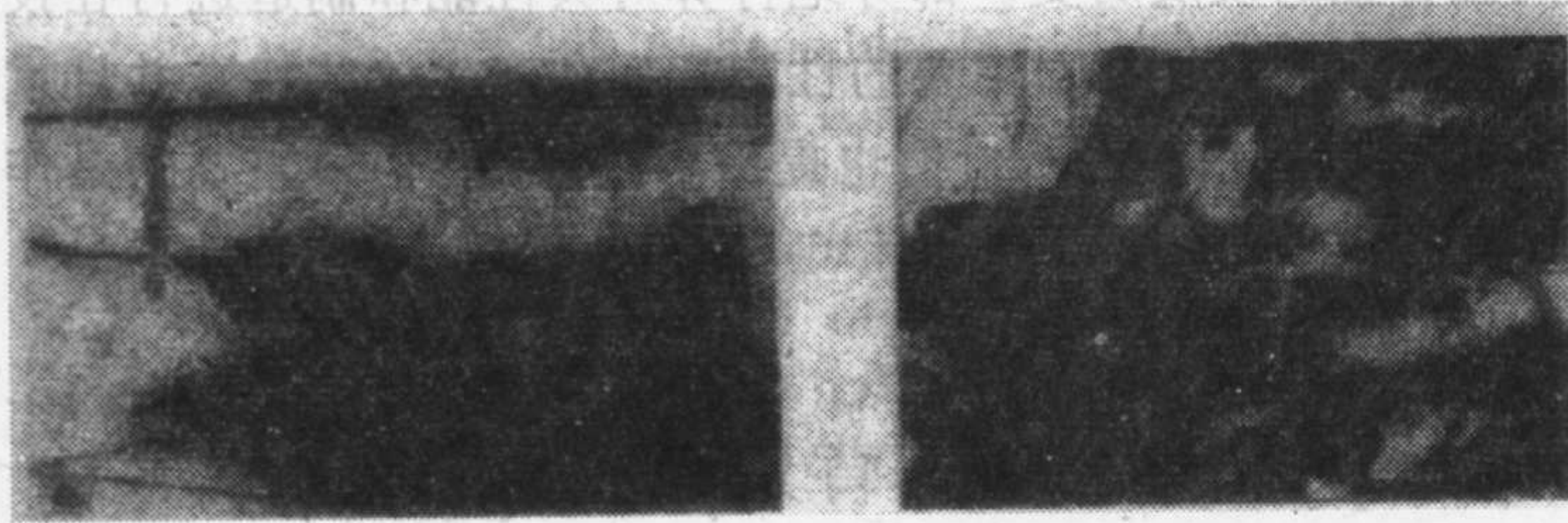


图 1-2 使用燃气涡轮发动机的飞机

(a)1939 年 8 月 27 日飞行的带有 von Ohain HeS3B 型 4928N 推力发动机的德国 He-178 型第一台涡轮喷气飞机;(b)Whittle 发动机,即 1941 年为 Gloster 慧星号提供动力的英国 W-1 型发动机。

随着这项新技术的发展,设计者们清楚地认识到,将温度提到更高,就会取得进展,而要做到这一步,就需要新的材料。从那时起,喷气发动机和工业燃气涡轮机一直是不断发展的极其重要的工程技术。而其发展也一直是依赖于高温合金性能。高温合金应用的技术领域是如燃