

高温合金 手册

《高温合金手册》编写组编

冶金工业出版社



高温合金手册

《高温合金手册》编写组编

机 密 资 料
不 准 翻 印

冶金工业出版社

高温合金手册
《高温合金手册》编写组编

冶金工业出版社出版发行
北京印刷七厂印刷

开本大32 印张 10 3/8 字数 270 千字
1972年7月第一版 1972年7月第一次印刷
印数 00,001~3,000 册
统一书号: 15062·3009 定价(科四) 1.20 元

前 言

高温合金，是现代航空发动机、舰艇燃气轮机及某些火箭发动机等所必需的重要金属材料。国外从1942年起就开始了高温合金的研究试制，至今已有三十年的历史。

我国于1956年开始试制高温合金，至1958年大跃进期间，在毛主席的“自力更生，艰苦奋斗”等一系列光辉思想指引下，走上了独立自主的发展道路。高温合金科研、生产战线上的广大革命职工，与使用、设计部门密切结合，互相促进，团结战斗，在十多年的时间里，从无到有，从低到高，掌握和创制了五十多种高温合金，初步建立了我国的高温合金系统；由我国独立创制的一些高温合金，其性能也已接近或达到世界先进水平；在合理布局、生产规模及生产工艺上也取得了显著成绩。我国航空工业和其他国防工业所需的高温合金材料已经能够完全立足于国内。这是毛主席无产阶级革命路线的胜利，是毛泽东思想的胜利！

伟大领袖毛主席教导我们：“人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。”我国在高温合金的生产、科研方面虽然取得了较大成就，但是在品种质量和生产工艺上还存在着一些问题，有待我们去改进、充实和提高。多年来，在高温合金的科研、生产、使用方面积累的丰富经验，也有待我们去进行较系统的总结。

为了满足我国高温合金生产、科研、使用部门广大职工的迫切要求，冶金工业部、第三机械工业部和中国人民解放军总字第816部队共同主持组织了《高温合金手册》编写组。北京钢铁研究院、中国人民解放军0814部队、上海钢铁研究所、抚顺钢厂、三机部410厂和冶金工业部情报标准研究所等单位参加了手册的编写工作。

本手册共分四章。第一章为高温合金概述。在第二、三、四章收集了铁、镍基变形合金三十四个牌号，铸造合金十五个牌

号，高温合金焊丝十八个牌号。除高温合金焊丝外，四十九个铁、镍基变形和铸造高温合金大致可分为三类：第一类为正常生产、使用的合金，约有二十九个牌号；第二类为已通过试车、小量生产、使用或即将推广使用的合金，约有八个牌号，如GH139、GH143、GH151等；第三类为已完成工业性试制，但尚未经试车考验或正在进行试车考验的合金，约有十二个牌号，如GH13、GH167、K18、K20等。另外，为便于有关人员查照参考，在本书附录中列入了温度、强度单位换算表，国内高温合金成分、性能一览表等有关资料。

高温合金的牌号统一用符号GH、K、HGH来表示。GH表示变形合金，K表示铸造合金，HGH则表示高温合金焊丝。手册中各合金的化学成分、力学性能、物理性能、工艺参数、组织结构等资料，主要来源于科研、生产、使用单位的总结报告和实际生产、使用中积累的数据，另外也参考了航空材料手册中某些有关数据。由于我们的水平有限，了解情况不够，所以手册中难免有不妥和不够之处，希同志们指正。手册中有些合金正处于试用阶段，有些合金还未经长期试车考验，故本手册带有一定程度的试用性质。希望有关单位更好地累积数据，及时总结经验，以便今后修改、补充，使手册更趋完善。

《高温合金手册》编写组

一九七一年十一月

目 录

前言

第一章 高温合金概述.....	1
第二章 变形高温合金.....	10
一、铁基变形合金.....	10
1 GH161	10
2 GH13	14
3 GH139	19
4 GH167	22
5 GH35	30
6 GH140	34
7 GH131	40
8 GH15	46
9 GH138	52
10 GH16	58
11 GH14	63
12 GH130	72
13 GH302	82
14 GH95	92
15 GH36	97
16 GH38A	102
17 GH40	108
18 GH132	113
19 GH136	122
20 GH78	128
21 GH135	131
二、镍基变形合金.....	142
1 GH30	142
2 GH169	148
3 GH39	152
4 GH44	159
5 GH128	168

6	GH141	175
7	GH33	180
8	GH43	186
9	GH37	191
10	GH143	200
11	GH49	206
12	GH50	214
13	GH151	219
第三章 铸造高温合金		227
一、铁基铸造合金		227
1	K13	227
2	K11	231
3	K14	233
二、镍基铸造合金		236
1	K6	236
2	K12	240
3	K1	245
4	K18	249
5	K5	255
6	K4	260
7	K2	263
8	K3	270
9	K17	276
10	K16	283
11	K19	288
12	K20	293
第四章 高温合金焊丝		298
附录1 合金牌号对照表		301
附录2 合金力学性能和物理性能的代表符号		302
附录3 摄氏(°C)—华氏(°F)温度换算表		304
附录4 公制和英美制常用单位换算因子		307
附录5 应力单位换算表		308
附录6 我国高温合金成分, 主要性能一览表		312
附录7 希腊字母表		322

第一章 高温合金概述

(一)

高温合金，也称热强合金，是二十世纪四十年代初由于航空技术的发展需要而逐步发展起来的一种新型金属材料。英国在镍—铬电热材料的基础上先进行了强化镍—铬基体的探索，发现了铝、钛等元素在这种基体中的沉淀硬化作用，促进了镍基高温合金的发展，同时也为航空涡轮发动机性能的提高提供了有利条件。此时具有代表性的镍基高温合金就是英国的“尼莫尼克”75及80A。随后，美国、苏联也相继研制了高温合金。美国最初的牌号为“因康奈X”，苏联试制成功了与“尼莫尼克”75及80A相似的ЭИ435及ЭИ437Б。

国外高温合金的发展迄今有三十年的历史。在合金方面已经自成体系的主要有英国、美国及苏联。合金的最高性能水平基本相同，生产工艺也大致类似。合金牌号除美国较多、较杂外，英国和苏联大致都有四十个左右。合金使用温度的提高速度平均每年约 10°C 。

我国自1956年起开始试制高温合金。在大跃进期间开始了独立自主的试制和研究工作。十五年来，除仿制了一些苏、英、美的合金外，并创制了多种镍基和铁基合金，包括 950°C 以上使用的大部分高性能合金，基本上形成了我国的高温合金体系。合金使用温度的提高速度平均每年约 20°C 。

高温合金一般分镍基、铁基和钴基三类。发展最快，使用最广的是镍基合金，其次是铁基合金。钴基合金在国外也有相应发展，但限于资源，我国没有发展应用。高温合金按其能否经受压力加工又可分为变形合金及铸造合金两类。目前镍基变形合金的最高性能水平为 950°C （即可在 950°C 下作涡轮叶片长期使用），镍基铸造合金的最高性能水平为 1050°C （即可在 1050°C 下作导

向叶片或较小应力的涡轮叶片长期使用)。铁基变形合金国外大多使用在 700°C 以下。我国在这方面进行了较多的工作，已可能将铁基变形合金的工作温度提高到 $750\sim 800^{\circ}\text{C}$ 。铁基铸造合金也有一定发展，有可能用作 900°C 以下的导向叶片及涡轮叶片。

高温合金的主要特点就是具有足够的高温强度，并在高温氧化性气氛或燃气条件下能够长期工作。根据不同用途，对高温合金的性能要求也不同。一般对合金的综合性能（如持久性能，瞬时机械性能，破断韧性，缺口敏感性，疲劳性能，物理性能及组织稳定性等）要求最高的是用作涡轮叶片材料。为得到所需的性能，需要在化学成分的选择、冶炼、浇铸、压力加工等工艺以及热处理制度、合金组织结构等方面进行深入的试验研究。但合金强化的主要途径不外有固溶强化、沉淀硬化及强化晶界三方面。所谓固溶强化，就是在镍-铬或铁-镍-铬基体的固溶度范围内加入一定量的钨、钼、铌、钽、钴等元素，使形成镍基或铁基复杂固溶体。由于形成固溶体时不同元素原子的交互作用，经常使基体晶格产生畸变而导致内应力的形成，从而使位错运动受到牵制而产生固溶强化作用。固溶强化型高温合金，一般具有良好的抗氧化，抗腐蚀性能与导热系数较高，塑性指标与工艺性能较好等优点，但高温强度水平较低。为了进一步提高高温强度，必须进行沉淀硬化（也称时效强化），即在铁基或镍基基体中加入一定数量的铝、钛、铌、碳等元素，使在热处理过程中，从合金内部沉淀析出金属间化合物和各种不同类型的碳化物，从而产生显著的强化作用。在 700°C 以上工作的一般铁、镍基时效合金中，金属间化合物是强化合金的主要因素。为了较充分地发挥金属间化合物的强化作用，经常需要在沉淀硬化的同时，对合金基体进行适当的固溶强化。这样，不仅可以进一步提高合金的软化温度，并且可以使金属间化合物相本身的强度和热稳定性显著提高。因为一部分固溶强化元素（如钨、钼、铌等）将固溶进金属间化合物而使其进一步合金化。强化合金的另一条重要途径是强化晶界。晶粒边界一般都比较薄弱、有空穴，在高温下强度比较

低，加上有些低熔点杂质在晶界富集较多，使晶界状态进一步恶化。为改善晶界状态，在铁、镍合金中一般采取使表面活性元素硼间隙固溶于晶间，并使碳化物呈颗粒状在晶界优先析出的办法，以强化晶界。碳化物在晶界的析出，使碳化物周围形成晶界贫化区而改善晶界的塑性，从而为合金的强度得以较充分地发挥，创造了有利条件。另外，通过加入微量稀土元素，使富集在晶界的低熔点有害杂质转变为高熔点化合物而消除其有害影响，从而使晶界状态进一步得到改善。

高温合金除以上所述固溶强化及沉淀硬化型合金外，近年来弥散强化型合金也有一定的发展。这是一种用粉末冶金方法，将高度稳定的氧化物质点作为强化相弥散分布在合金基体中，使起弥散强化的作用，从而获得具有良好高温强度的新型材料。由于氧化物弥散相热稳定性高，且不溶于基体，可望在1100~1200°C下长期工作。

高温合金材料主要使用于航空发动机及其他各种燃气轮机，用以制作在高温下工作的关键部件。因此，对材料的质量及质量的稳定性都有较严格的要求。必须采取有效措施，大力提高高温合金的生产质量，多快好省地为建设强大的社会主义祖国服务。

(二)

高温合金在航空涡轮发动机及其他各种燃气轮机上主要用作涡轮叶片，导向叶片，涡轮盘，燃烧室，加力燃烧室及其他高温承力件及紧固件。在压缩比很高的航空涡轮发动机上，也需要用高温合金来制作某些高温构件。所有这些构件，由于它们的工作条件不同，对高温合金材料性能的要求也不同，今简要分述如下：

1. 涡轮叶片用高温合金

涡轮叶片是涡轮发动机上最关键的构件之一，在发动机工作中，涡轮叶片无论就其工作时所经受的温度和机械载荷来说，都是最严酷的，因此对涡轮叶片材料都有较严格的要求：

(1) 应具有尽可能高的高温抗氧化和抗燃气腐蚀的能力。

(2) 应具有足够的热强性(即在工作条件下有足够的抵抗蠕变和持久断裂的能力)和良好的综合性能,包括良好的机械疲劳、热疲劳性能,足够的塑性和冲击韧性,并无缺口敏感性。

(3) 材料应具有尽可能高的导热性及尽可能低的热膨胀系数。

(4) 材料应具有良好的或足够的工艺性,对叶片材料来说,主要是热加工性,切削加工性以及良好的铸造性能。

可以用作涡轮叶片的合金有:GH 33、GH 130、GH 302、GH37、GH143、GH49、GH151以及铸造合金K 17、K 18、K 5、K 19、K 20等。其各温度下的持久强度如图 1 所示。

GH151 是我国独创的一种高性能镍基变形合金,具有相当高的热强性和较好的综合性能。

GH130 及GH302与GH37合金相比,具有低镍的优点,较符合于我国的资源条件,它们在800°C以下能够代替镍基合金GH37及GH33,但在800°C以上,其长期组织稳定性不及GH37合金。

2. 涡轮盘用高温合金

涡轮盘是涡轮发动机上一个很重要的部件。涡轮盘在工作时受热不均,轮缘温度比中心部分的温度要高得多,因此热应力较大,尤其在径向温度梯度较大的情况下,更为如此,加上离心力的作用,往往使涡轮盘的工作应力上升到比较高的水平。涡轮盘榫齿部分由于温度高、受力大,加上疲劳、振动及应力集中等现象,工作条件还要更复杂些,因此,对用作涡轮盘的合金一般提出如下一些要求:

(1) 在轮缘的工作温度下,应具有高的屈服强度、切变强度、蠕变强度及良好的疲劳性能,并无缺口敏感性。盘坯径向与切向性能差异要小。

(2) 膨胀系数尽可能低。

(3) 有良好或较好的切削性能。

(4) 有一定的抗氧化性。

$$P = T(20 + \log t) \times 10^{-3}, [T - ^\circ\text{K}, t - \text{小时}]$$

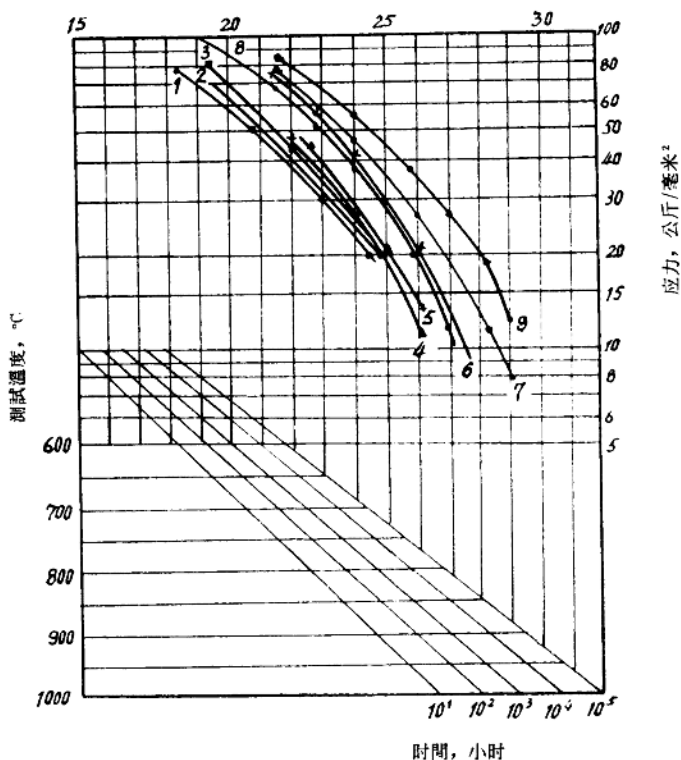


图 1 某些涡轮叶片合金持久强度曲线

1.GH135 2.GH33 3.GH130 4.GH302 5.GH37
6.GH49 7.GH151 8.GH143 9.K19

常用于制作涡轮盘的材料 GH36、GH132、GH135、GH33 等，其持久性能如图 2 所示。

涡轮盘在涡轮发动机上的使用量较大，而工作温度比较低，大多在 750°C 以下。因此一般都采用含镍、铬等元素较少的铁基材料，如 GH36、GH132 及 GH135 等。在某些承受应力更大或工作温度更高的涡轮发动机上则需采用镍基合金。

$$P = T(20 + \log t) \times 10^{-3}, [T - ^\circ\text{K}, t - \text{小时}]$$

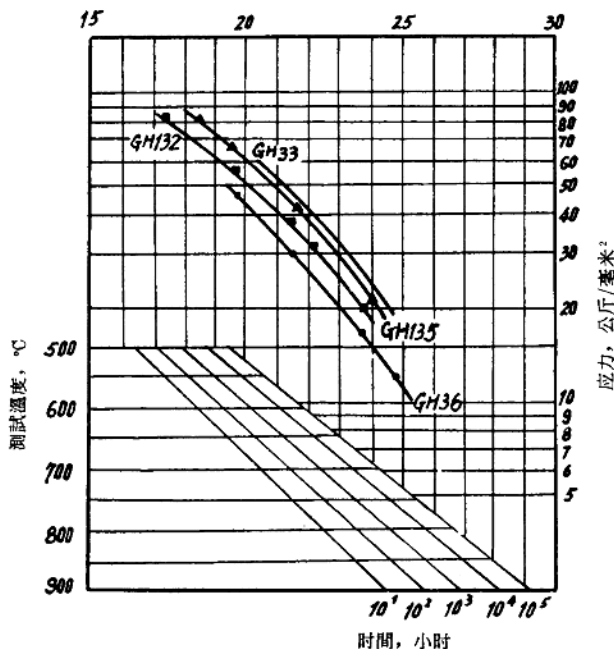


图 2 某些涡轮盘材料的持久强度曲线

3. 导向叶片用高温合金

导向叶片的第一级是航空涡轮发动机上受热冲击最大的零件之一，尤其当燃烧室燃烧不均、工作不良时，一级导向叶片所受的热应力更大，往往成为导向叶片提前破裂的主要原因，但由于它是静止叶片，所受的机械负荷并不大。

通常由于热应力所引起的扭曲，温度剧烈变化所引起的裂纹以及过热所引起烧伤是导向叶片在工作中所产生的主要缺陷。根据导向叶片的工作条件，一般要求所采用的材料具有以下特性：

- (1) 有足够的持久强度及良好的热疲劳性能。
- (2) 有较高的高温抗氧化能力。

在导向叶片的选材问题上，应注意一级导向叶片与后几级导向叶片工作条件的差别。导向叶片大都采用精密铸造的方法生产，也可用时效强化型高温合金板材通过成型焊接的方法制造。

常用的导向叶片材料有K1，K3，K5，K6，K12，K14等合金，一般用作涡轮叶片的铸造合金也可用作导向叶片，某些导向叶片合金的持久强度示于图3。

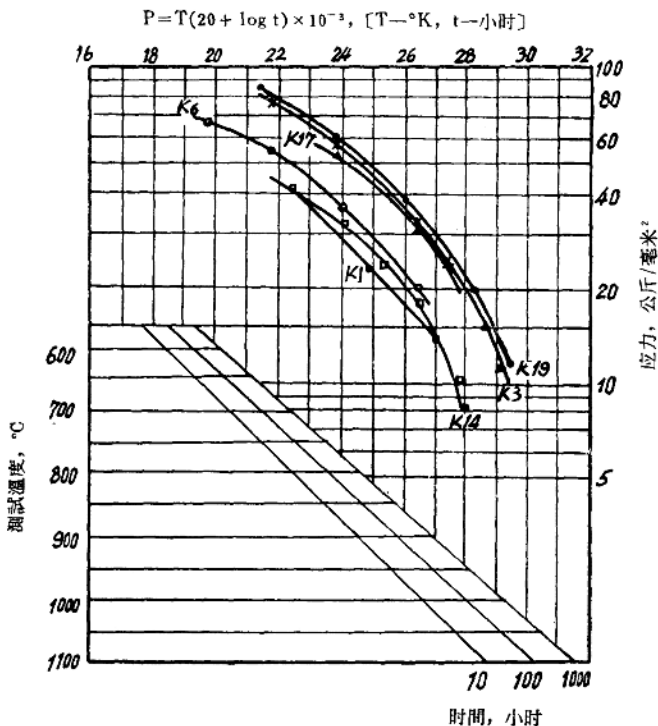


图3 某些导向叶片合金的持久强度曲线

4. 燃烧室及加力燃烧室用高温合金

根据燃烧室的工作条件及其制作方法，对制造燃烧室的材料一般提出如下要求：

- (1) 高的抗氧化性能。
- (2) 足够的持久强度及良好的冷热疲劳性能。
- (3) 良好的工艺塑性。
- (4) 良好的焊接性能。
- (5) 在正常工作温度下合金组织有足够的长期稳定性。

目前我国常用的燃烧室材料有GH30, GH39, GH44, GH140, GH128等, 其持久强度曲线如图4所示。

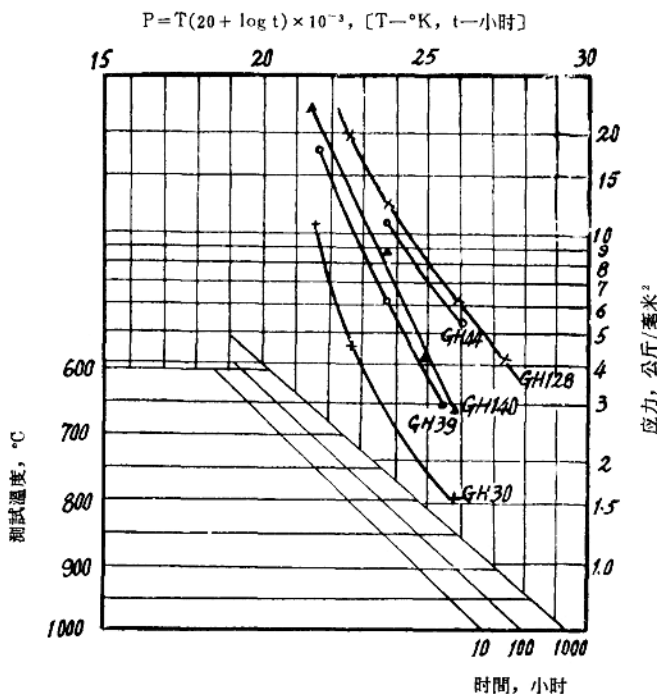


图4 某些燃烧室合金的持久强度曲线

燃烧室用的高温合金大多数属于简单的镍-铬合金或固溶强化型合金, 英国有些航空发动机也采用时效合金(如C263), 工

作寿命都可达到 4000 小时以上，问题在于燃烧室的冷却是否良好，燃烧是否均匀。

对加力燃烧室材料的要求大体与燃烧室材料相同，但一般需要有更高的高温强度指标，我国目前较好的加力燃烧室材料有 GH131，GH44 及 GH128 等。

注：在图 1 至图 4 中，P 为拉逊密罗系数。

第二章 变形高温合金

一、铁基变形合金

1	铁基变形合金	GH161
---	--------	-------

化 学 成 分, %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	B	Fe	S	P
0.06~0.12	≤0.8	≤1.5	22.0~26.0	23.0~26.0	1.10~1.70	0.01	余	≤0.02	≤0.03

注: B按计算量加入。

瞬 时 机 械 性 能

产品种类	状 态	试验温度 °C	E 公斤/毫米 ²	σ_b 公斤/毫米 ²	δ_5 %
冷 轧 板	1000°C, 10分, 空冷	20	19900	63	46
		400	17200	55	35
		500	16600	55	33
		600	15800	49	36
		700	15000	33	69
		800	14400	21	99
		900	13500	11	124
		1000		6.3	131

持 久 性 能

产品种类	状 态	试验温度 °C	σ 公斤/毫米 ²	r 小 时	δ %
冷 轧 板	1000°C, 10分, 空冷	700	12	179~207	46~53
		800	18	19~24	68~77