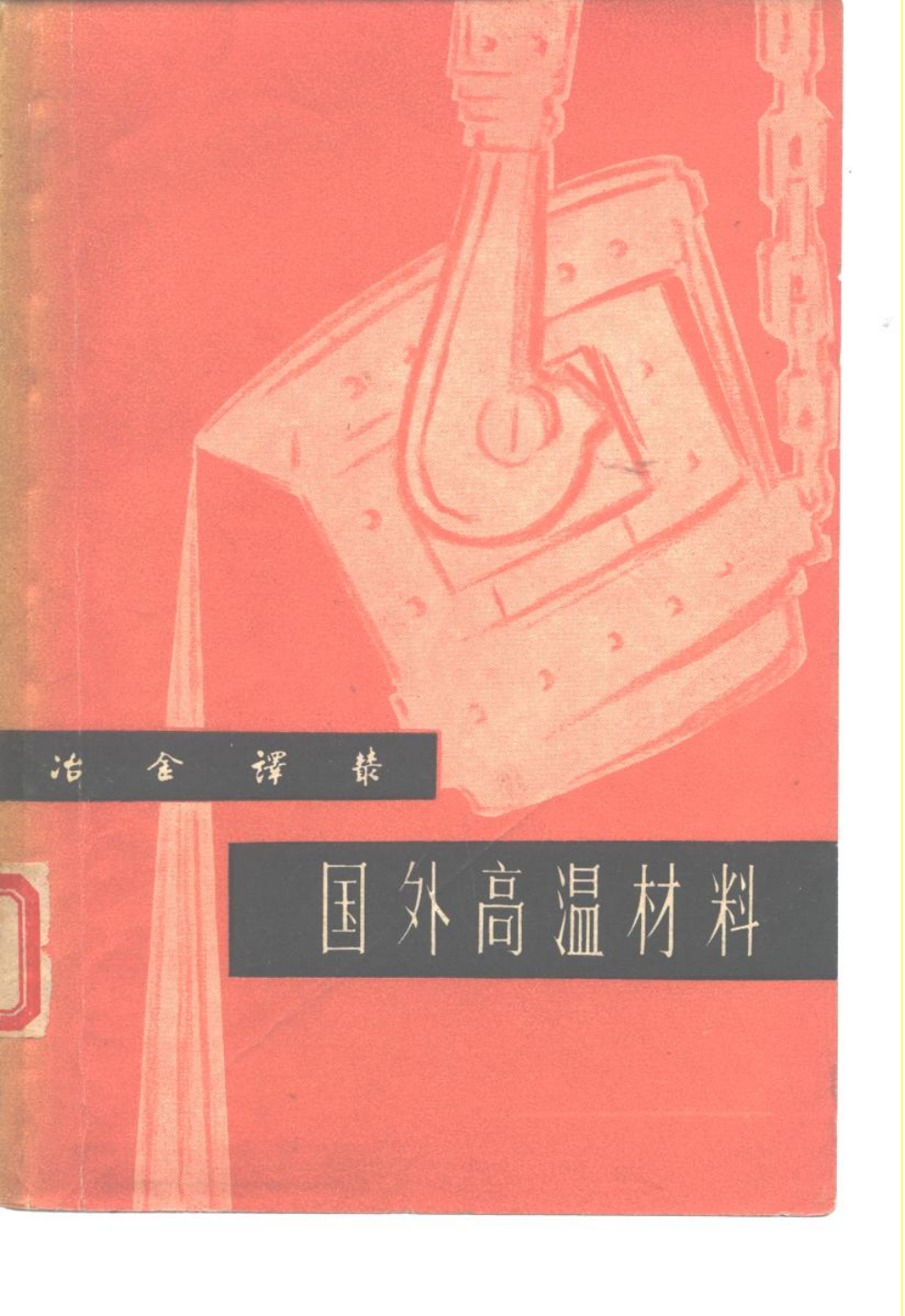




治 金 譯 叢

国外高温材料

71.227
478
C.2

冶 金 譯 丛
国 外 高 温 材 料

党 剛 陈应星 周鈞禾等 編譯

上海市科学技术編譯館

目 录

一、高温材料的现状和展望	(1)
二、石墨和难熔化合物的现状和将来	(29)
三、陶瓷材料领域中的新成就	(39)
四、高温涂层技术的进展	(47)
五、苏联的高温材料情况	(69)
六、美国难熔金属薄板的发展情况	(74)
七、胶粘材料的现状	(83)
八、真空熔炼热强铸造铁基合金	(92)
九、耐热镍基合金的真空熔炼和铸造	(96)
十、高真空电弧熔炼	(104)
十一、电子束用于难熔金属	(114)
十二、12% Cr 耐热钢的成形性	(122)
十三、16/13 W 型奥氏体铬镍钢组织稳定性的研究	(140)
十四、在 800°C 下工作的钢种 9H 692	(162)
十五、二次淬火对合金 XH 35B T10 组织和性能的影响	(167)
十六、热强合金的热机械处理	(175)
十七、高温塑性变形对镍铬基耐热合金机械性能的影响	(180)
十八、稀土元素对热强镍铬基合金性能的影响	(185)
十九、论沉淀硬化型 Ni-Cr-Al 耐热合金在 γ' 相析出的温度范围 内的塑性	(190)
二十、镍基合金的时效动力学特性	(206)
二十一、热处理对热强镍铬基合金微细结构变化和性能的影响 ..	(216)
二十二、难熔金属的某些特征	(223)
二十三、难熔金属的制作和加工	(248)
二十四、制造火箭的各种材料	(261)
二十五、火箭技术中的金属陶瓷多层涂层	(270)

一、高温材料的现状和展望

- 一、前言
- 二、选择高温材料的几个因素
- 三、应用于 $1,200 \sim 1,800^{\circ}\text{F}$ 的高温材料——超合金
- 四、应用于 $1,800^{\circ}\text{F}$ 以上的难熔金属
- 五、高温合金的熔炼与铸造
- 六、其它脆性的高温材料
- 七、展望

一、前 言

随着动力、化工、航空、原子能和火箭导弹的发展,对高温材料提出了愈来愈高的要求。就动力设备而言,1924 年蒸汽轮机的工作温度为 700°F ,以每年平均提高 14°F 的速度发展至 1960 年的 $1,200^{\circ}\text{F}$; 燃气轮机 20 年前的工作温度仅 $1,300^{\circ}\text{F}$,而目前提高至 $1,750^{\circ}\text{F}$ 以上,每年平均提高 22.5°F 。近十年来由于火箭导弹和宇宙航行的发展,更要求能耐 $3,000^{\circ}\text{F}$ 或 $4,000^{\circ}\text{F}$ 以上的高温材料。目前高温材料的发展,已成为这些技术进展的决定性因素。

高温材料的种类很多,有铁基的、镍基的、钴基的……等等,一般把能耐高温 $1,200 \sim 1,800^{\circ}\text{F}$ 的高强度金属叫作超合金或热强合金,而 $1,800^{\circ}\text{F}$ 以上的叫作难熔金属,还有金属陶瓷等其它脆性材料。本文将就这三类材料的选用、制造及工艺特点作一综合性的介绍。由于主要参考文献选自美、英等国,所以介绍的情况并不是全面的。

二、选择高温材料的几个因素

1. 力学性能 选择高温材料时首先考虑的是力学性能,即在使用温度下的材料强度。材料的高温强度不仅是温度的函数,而且也是使用时间的函数,故产生所谓应力-时间-温度参数。高温强度是指在高温下长时间负荷的断裂强度和蠕变极限。一般所谓长时间,往往是指一万小时

或十万小时,但是实际上应该依工作条件而异,例如蒸汽輪机和固定式燃气輪机所需要的性能数据,就应该是 10 万小时,但是噴气式飞机和火箭導彈就只考虑几百小时甚至几小时、几分钟。

除强度以外,还应考虑材料的塑性如延伸率、收縮率、冲击韌性等。由于某些零件只允許有一定的伸长量,因此还要考虑总的蠕变量。由于在高温下除了机械应力以外,还有热震,所以塑性也是一个重要的因素,特别是冲击值。有很多材料在長時間工作以后,由于組織不稳定会产生脆性,而有些材料在某一温度範圍内会发现热脆現象。

在大部份高温应用中的强度和重量比值,即所謂强重比是一个重要的因素。在空运工具中,增多一磅結構重量必須付出很大的代价,因而需要額外的燃料和动力,这就又要增加重量,并要求更大的上升力,以致有些材料虽然有很好的高温强度,但因比重較大,其发展就受到了限制。

此外,还应考虑到这样一个因素,就是在指定的高温下符合强度要求的材料,在其它温度下可能会引起困难而受到限制,有些合金的强度在使用温度下操作过一个时期后,在較低温度下会比使用前的低;还有些合金能适应使用时的应力,但在較低温度时脆性很严重。

其它还有高温下的彈性模量、缺口敏感性和疲劳强度等等,都应根据結構的要求給以适当考虑。

2. 物理性能 抗氧化性、耐腐蝕性、热膨脹系数、导热系数、輻射系数以及热中子俘获截面等物理性质,都是在特定使用条件下或在高温使用中重要的設計因素。

由于使用条件下的温度不同,因而零件有不同的膨脹,或是不同的合金也具有不同的膨脹。因而,在其接合处就造成了热应力,有时,这种应力达到全部負荷的 50% 或更多。所以,一般希望高温材料具有最低的膨脹系数。在不同合金接合在一起的情况下,希望具有相同的膨脹系数。

导热系数在燃燒室的应用中也很重要,因其高热量必須迅速地傳布或消散,否則有可能引起热集中甚至燒毀。用冷却介质冷却的零件,其导热系数更加重要,不仅要具体了解其絕對值,而且也要求較高的导热系数。

輻射率是发电厂設計者最近才考虑到的因素。在燃燒室的內部,希望能最大限度地放射出燃燒气体的热量,而在噴气式发动机中,又希望将

最大的热量輻射到空气中去。輻射率可使操作温度有几百度的差别。

原子反应堆材料需要有小的中子俘获截面，而控制棒的材料又需要有大的中子俘获截面。

另外，抗氧化性和耐腐蝕性也是在选择材料时的重要因素。一般說来，在有含硫化合物的場合下，应该避免使用高鎳合金。高鉻合金不宜用于高真空中。在燃气介质中，有些金属化合物对某些合金有显著的侵蝕能力，例如大家知道的鈹腐蝕就是一个例子。

3. 加工性能 要制成适用的零件，必須有一定的加工方法。有的合金不能軋制或鍛压成形，因此就不适用于制作薄板的零件。有些合金难以切削，因此要求在热态 ($400 \sim 800^{\circ}\text{F}$) 或特殊气氛中成形。有的是迅速加工硬化，需要多次間歇退火快速冷却，以避免沉淀相；有的甚至完全不能加工，必須用精密鑄造或精密鍛造的方法成形。

焊接性能在高温材料中也是一个重要問題。有些合金容易焊接，而有些合金的焊接性能就很差。

因此，在选择材料时，还要考虑它的加工性是否适宜于制作某种另件。

一般高温材料都需要特殊的加工技术，因而在发展高温材料的同时，也发展了真空冶金、模鍛、惰性气体下焊接、粉末冶金和表面鍍层等技术。

三、应用于 $1,200 \sim 1,800^{\circ}\text{F}$ 的高温材料——超合金

开始时，超合金中强度最高的为鉄基合金，如 Cr16-Ni25-Mo6 和 Cr19-Ni9W-Mo (参閱表 2)。之后，鈷基合金“維太隆”(Vitalium)S-816 和 X-40 取而代之；随后，这領先的地位又不得不让給鎳基合金。今日在可能获得的高温材料中，無論是軋制材料或鑄件，强度最高的皆为鎳基超合金。在英国，鈷基超合金并不被重視，那里的发展程序是从鉄基直接轉到鎳基的“尼蒙尼 80”合金(Nimonic 80)。

接着出現的鎳基合金有 M-252(成分見表1)这种成分复杂的合金，其中某些元素目前看来是不需要的。进而发展的有“尤地勉”(Udimet500)，它的持久强度超过上述的“尼蒙尼 80”和 M-252。这些合金仍是用于氧化条件下的仅有高温材料。它們的工作温度有时高达 $2,000^{\circ}\text{F}$ 。至于它們的主要性质，簡括地列于以下三个表里：

表1 镍基超合金

合金名称	公 称 化 学 成 分							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W
G-157	0.06	1.25	0.40	27	余	—	1.5	1.5
J-1500	0.15	0.5	0.5	20	余	10	10	—
M-252								
GE-B-129(C)	0.06	0.4	0.4	5	余	—	15	—
M-600	0.08	—	—	19	55.5	—	7	—
I-1360(C)	0.10	—	—	10	70.5	—	5	—
DCM	0.08 ^{2K}	0.10 ^{2K}	0.15	15	余	—	5.25	—
Reni-41	0.09	—	—	19	余	11	10	—
Asteoloy	0.06	—	—	15	余	15	5.25	—
GMR-235(O)	0.15	0.25 ^{2K}	0.60 ^{2K}	15.5	余	—	5.25	—
GMR-235D(C)	0.15	0.10 ^{2K}	0.30 ^{2K}	15.5	余	—	5.0	—
HastelloyB	0.10	0.8	0.7	0.6	余	2.5 ^{2K}	28	—
HastelloyC	0.07	0.8	0.7	16	余	2.5 ^{2K}	17	4
HastelloyD(C)	0.12	1.0	9.0	—	余	2.5 ^{2K}	—	—
HastelloyN	0.06	0.8 ^{2K}	0.5 ^{2K}	7	余	0.5	16.5	—
Hastelloy R-235	0.15	—	—	15.5	余	2.5 ^{2K}	5.5	—
HastelloyW	0.12 ^{2K}	1.0 ^{2K}	1.0 ^{2K}	5.0	余	2.5 ^{2K}	24.5	—
HastelloyX	0.10	0.5	0.5	22	余	1.5	9	0.6
Inconel (Inconel Alloy600)	0.04	0.20	0.20	15.8	76.0	—	—	—
Inconel“M” (Inconel Alloy721)	0.04	2.25	0.12	16.0	71.0	—	—	—
Inconel“W” (Inconel Alloy 722)	0.04	0.55	0.20	15.0	75.0	—	—	—

的主要性质

(%)					特有的断裂强度* (1,000磅/时 ²)						典 型 用 途
Nb	Ti	Al	Fe	其它	1,200°F 100 1,000 小时 小时		1,500°F 100 1,000 小时 小时		1,800°F 100 1,000 小时 小时		
—	2.0	0.75	6.0 ^{2K}	—	—	—	14.5	10.5	—	—	板材合金
—	3.0	1.0	—	—	102	88	37	23	—	—	燃气轮机的零件、 板材
2	—	6.0	4	0.5B	—	—	47	29	—	—	高温结构零件
—	2.3	1.1	13	—	—	—	28	17	—	—	高温结构零件
2	—	6.0	4.5	0.3B	—	—	40.5	27.3	9.4	4.8	高温结构零件
—	3.5	4.6	5.0	0.08B	—	—	—	—	20	11.5	航空燃气轮机叶 片、零件
—	3.1	1.5	—	0.01B	110	102	45	29	11	—	航空燃气轮机零 件、板材、螺栓
—	3.5	4.4	—	0.03B	—	—	50	—	—	—	喷气式发动机零 件、锻件、铸件
—	2.0	3.0	10	0.06B	—	—	38	29	11	—	喷气式发动机零件
—	2.5	3.5	4.5	0.05B	110	100	56	39	17.5	—	喷气式发动机零件
—	—	—	5	0.30V	50	36.5	16.5	10.4	—	—	耐蚀合金在氧化条 件下用至1,400°F
—	—	—	5	—	54	42.5	18.5	14.5	—	—	发动机零件、集合 器环、燃烧室
—	—	—	1	3.0Cu	—	—	—	—	—	—	抗腐蚀合金
—	—	—	5 ^{2K}	0.01B	42	29	13	68	—	—	耐热的氟化盐
—	2.5	2.0	10	—	85	63	40	30	8	5	燃气轮机、喷气发动 机的零件和板材
—	—	—	5.5	0.6V ^{2K}	—	—	—	—	—	—	喷气式发动机透 平环,以及用于 连接不同金属
—	—	—	18.5	—	43	32	14.3	9.5	5.2	3.0	喷气式发动机零 件,抗氧化性好
—	—	—	7.20	—	23	14.5	8.0	5.6	2.8	1.8	燃烧室衬垫、分歧 管、抗氧化性好
—	3.0	—	7.20	—	55	35	17	10	—	—	航空发动机阀门
—	2.40	0.6	6.50	—	74	54	19	11.5	3.2	—	板材金属零件

表1 (續)

镍基超合金

合金名称	公称化学成分							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W
Inconel "X" (Inconel Alloy X-750)	0.04	0.70	0.30	15.0	73.0	—	—	—
Inconel "X550" (Inconel Alloy 751)	0.04	0.70	0.30	15.0	72.5	—	—	—
Inconel Alloy 700	0.12	0.10	0.30	15.0	46.0	28.5	3.75	—
Inconel Alloy 702	0.04	0.05	0.20	15.6	79.5	—	—	—
Inconel Alloy 713C (Inconel Alloy 713)(C)	0.12	0.10	0.30	11.5	74.0	—	4.5	—
Inconel Alloy 718	0.04	0.20	0.20	19	52.5	—	3.0	—
Waspalloy	0.07	0.7	0.4	19	余	14	4.3	—
Waspalloy Mod	0.05	—	—	19	余	11.5	7	—
Udimet 500	0.08	0.75 _※	0.75 _※	19	余	19.5	4.0	—
Udimet 520	0.05	—	—	19	余	12	6	1.0
Udimet 700	0.15 _※	—	—	15	余	18.5	5.2	—
Unitemp AF 1753	0.24	0.05	0.10	16.25	余	7.2	1.6	8.4
Nicrotung (C)	0.10	—	—	12	余	10	—	8
TRW1800 (C)	0.09	—	—	13	余	—	—	9
IN-100PDR1 100 (C)	0.18	—	—	10	余	15	3	—

※ 最高量; * 100 及 1,000 小时的断裂; (C) 指铸造合金。

的主要性质

表1(續)

(%)					特有的断裂强度* (1,000 磅/时 ²)						典 型 用 途
Nb	Ti	Al	Fe	其 它	1,200°F 100 1,000 小时 小时		1,500°F 100 1,000 小时 小时		1,800°F 100 1,000 小时 小时		
0.85	2.50	0.80	6.76	—	80	68	28	16	3.3	2.3	喷气发动机零件、 结构零件和螺栓
1.00	2.50	1.20	6.75	—	—	—	34	21	3.3	—	喷气式发动机零件、 结构零件和螺栓
—	2.20	3.00	0.70	—	100	87	43	30	6.0	3.4	燃气轮机零件
—	0.70	3.40	0.35	—	54	41	15	9	3.1	2.5	2,400°F 下具有优 越的抗氧化性能
2.0	0.6	6.0	1.0	—	101	92	68	47	20	15	喷气式发动机动 叶片、零件
5.2	0.8	0.6	18	—	100	85	—	—	—	—	高温结构零件
—	3.0	1.3	1	0.006B	110	86	40	25	6.5	—	喷气式发动机动 叶片、零件
—	2.5	1.2	1	—	—	—	—	—	—	—	喷气式发动机动 叶片、零件
—	2.9	2.9	1.2	0.01B	—	94	46	33	12	—	燃气轮机零件、板 材、螺栓
—	3.0	2.0	—	0.005B	—	—	48	33	—	—	
—	3.5	4.25	1.2	0.1 B	—	100	58	43	16	—	喷气式发动机零件
—	3.2	1.9	9.5	0.008B 0.06Zr	115	98	47	34	10	6.5	燃气轮机零件、紧 固件等
—	4	4	—	0.05 B 0.05Zr	—	—	68	45	22	13	高强度部件
1.5	0.6	6.0	—	0.07 B 0.07Zr	—	—	—	—	24	15	透平叶片
—	5	5.5	1.0	0.015B 0.05Zr	—	—	75	59	25	16	透平叶片

表2 铁基超合金

合金名称	公称化学成分							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W
A-286	0.05	1.35	0.50	15	26	—	1.25	—
D-979	0.05	0.60	—	15	45	—	4.0	4.0
17-14CuMo	0.12	0.75	0.50	15.9	14.1	—	2.5	—
Croloy 15-15 N	0.15 [※]	2.0 [※]	0.75 [※]	16	15	—	1.55	1.40
CSA	0.25	4.0	0.4	18	5	—	1.3	1.3
HNM	0.30	3.5	0.5	18.5	9.5	—	—	—
Turbaloy 13	0.13	1.7	0.75	17.8	23.6	—	2.5	1.0
J-1300 M-308	0.08	—	—	14	33	—	4.0	6.5
M-813	0.08	—	—	18	35	—	4.0	—
Hastelloy F	0.05 [※]	1.50	1.00 [※]	22	45.5	2.25 [※]	6.5	1.0 [※]
Incoloy (Incoloy Alloy 800)	0.04	0.75	0.35	20.5	32	—	—	—
Incoloy "T" (Incoloy Alloy 801)	0.04	0.75	0.35	20.5	32	—	—	—
Inco 804 (Incoloy Alloy 804)	0.06	0.85	0.50	29.3	42.6	—	—	—
Incoloy Alloy 901	0.05	0.5	0.40	13	43	—	6.0	—
EME	0.10	0.5	0.7	19	12	—	—	3.2
Cr 16-Ni 25-Mo 6	0.08 [※]	1.35	0.70	16	25	—	6.0	—
Cr 19-Ni 9 W Mo	0.10	0.50	0.60	19	9	—	0.40	1.3
19-9DL	0.30	1.10	0.60	19	9	—	1.25	1.2
19-9DX	0.30	1.00	0.55	19.2	9	—	1.50	1.2

的主要性质

(%)					特有的断裂强度* (1,000 磅/时 ²)						典 型 用 途
Nb	Ti	Al	Fe	其 它	1,200°F 100 1,000 小时 小时		1,500°F 100 1,000 小时 小时		1,800°F 100 1,000 小时 小时		
—	2.0	0.2	余	0.3V	63	46	35	21	13	8.0	燃气轮机零件和螺栓
—	3.0	1.0	余	0.01B	94	76	63	44	35	22	可用到 1,500°F
0.45	0.25	—	余	3.0Cu	43	37	26	20.5	16.5	12	可用到 1,500°F
1.05	—	—	余	0.15N ₂	—	—	—	18	—	10	过热器管子、蒸汽管道
1.0	—	—	余	—	50	39	22.5	12.5	—	—	高温结构零件
—	—	—	余	0.23P	49	35	26	15.5	11	—	稀缺合金元素含量低
—	1.4	1.4	余	—	65	54	—	—	—	—	燃气轮机零件
—	2.0	2.25	余	0.25Zr	80	63	46	32	17	—	航空燃气机零件、螺栓
—	2.25	1.4	余	—	—	52	41	30	22	13	同上
2.0	—	—	余	—	42	36	26	17	14	9	用于强度和抗腐蚀并重的零件
—	—	—	46.0	—	32	23	15.5	10.5	8.8	5.8	抗氧化性和 Inconel 相似, 但含镍低而强度高
—	1.0	—	44.5	—	33	26.1	20.1	14.7	10.8	7.0	强度较 Incoloy 稍高
—	0.40	0.25	余	—	—	15	—	11	—	6.5	高温结构零件
—	2.8	0.20	34.0	—	94	78	55	40	24	15	燃气轮机转子轮盘
1.2	—	—	余	0.15N	44	35	20	13	—	—	气轮机螺栓和阀杆
—	—	—	余	0.15N	45	34	25	17	13.5	9	燃气轮机零件
0.44	0.40	—	余	—	41	34	28.5	—	11	—	用到 1,350°F
0.40	0.30	—	余	—	44	37	22	17	13	8.6	燃气轮机零件、导管零件、高温蒸汽涡轮工作件油精炼器
—	0.55	—	余	—	52.2	42	—	—	—	—	同上, 但合金中不含 Nb

表2 (續)

鐵基超合金

合 金 名 称	公 称 化 学 成 分							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W
19-9WX	0.11	—	—	20.5	8.5	—	0.50	1.55
UnitemP 212	0.08	0.30	0.30	16	25	—	—	—
Discaloy	0.04	0.9	0.8	13.5	26	—	2.75	—
W545	0.08*	1.50	0.40	13.5	26	—	1.5	—
Thermentol	0.05	—	—	—	—	—	3.3	—
G-192	0.60	8.5	0.55	22	—	—	—	—
22-4-9	0.55	8.5	0.15	20.5	3.5	—	—	—
HTX	0.45	8.5	0.45	21	8	—	1.5	—
HTX(C)	0.45	8.0	0.50	21	8	—	1.5	—
OMN	0.65	12.0	—	25	—	—	—	—
AF-71	0.30	18	0.30	12.5	—	—	3.0	—
AF-183	0.30	18	0.30	12.5	—	—	3.0	—
16-15-6	0.07*	7.5	0.50	16	15	—	6.0	—
S-590	0.43	1.25	0.40	20.5	20	20	4.0	4.0
N-155								
Multimet	0.15	1.5	0.50	21	20	20	3.0	2.5
K-42 B	0.03	0.7	0.7	18	42	42	—	—
Refractalloy 26	0.03	0.8	1.0	18	38	20	3.2	—
Refractalloy 70	0.04	2.0	0.3	20	21	30	8.0	4.2
Haynes NO, 56	0.25	1.2	0.5	20	13	11	4.5	1.0

W 最高量; *100 及 1,000 小时的断裂; (C) 指鑄造合金。

的主要性质

表2 (續)

(%)					特有的断裂强度* (1,000 磅/吋 ²)						典 型 用 途
Nb	Ti	Al	Fe	其它	1,200°F 100 1,000 小时 小时		1,500°F 100 1,000 小时 小时		1,800°F 100 1,000 小时 小时		
1.30	0.20	—	余	—	—	—	—	—	—	—	焊接 19-9DL 和类似的合金
0.50	4.0	0.05	余	0.07B 0.05Zr	100	88	63	42.5	—	—	高强度和抗腐蚀力达 1,400°F
—	1.75	0.10	余	—	52	41	30	20	15	—	燃气轮机零件和螺栓
—	2.85	0.20	余	0.08B	80	65	49	37	—	—	燃气轮机零件和螺栓
—	—	16	余	0.3V	19.3	10.0	—	—	—	—	作耐热用
—	—	—	余	0.35N	42	—	27	17	15	8.5	排气阀部件用
—	—	—	余	0.4N	45	36	28	18	14	8	蒸汽阀、燃气轮机零件
—	—	—	余	0.2N 0.23P	68	53	36	28	19	—	高温结构件
—	—	—	余	0.2N 0.22P	51	42	42	33	26	19	高温结构件
—	—	—	余	0.45N	65	55	25	18	13	10	稀缺元素含量低
—	—	—	余	0.2N 0.8V 0.2B	69	54	40	26	22	12	1,500°F 以下的含高强度钢板, 稀缺元素的量低
—	—	—	余	0.2N 0.8V	53	38.5	26.5	—	10.5	—	稀缺元素含量低
—	—	—	余	0.35N	60	40	30	20	—	—	燃气轮机压气机零件
4.0	—	—	余	—	50	38	32	25	22	16	燃气轮机零件
1.0	—	—	余	0.15N	52	43	30	23	20	16	喷气式发动机的燃烧室、后燃器、尾管、燃气轮机零件
—	2.1	0.2	余	—	66	40	37	27	17.5	11	蒸汽和燃气轮机零件、螺栓
—	2.6	0.2	余	—	80	63	51	38	27	18	燃气轮机零件、叶片、螺栓
—	—	—	余	—	56	42	33	24	19	15	燃气轮机零件、螺栓
1.0	—	—	余	—	49	39	23	17.5	17.5	12	与 N-155 相似, 尾管、热处理用支撑

表3 鉻基超合金

合 金 名 称	公 称 化 学 成 分							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W
S-816	0.38	1.20	0.40	20	20	余	4	4
S-816(C)	0.38	1.20	0.40	20	20	余	4	4
S-816+B(C)	0.40	1.00	0.40	20	20	余	4	4
V-36	0.27	1.00	0.40	25	20	余	4	2
AF-94	0.12	1.20	—	15	10	56	5	10
WF-11, L-605	0.10	1.50	0.50	20	10	余	—	15
HS-25	0.10	1.50	0.50	20	10	余	—	15
WF-31	0.15	1.42	0.42	20	10	余	2.6	10.7
J-1570	0.20	—	—	20	28	38	—	7
J-1650	0.20	—	—	19	27	余	—	12
X-40, HS-31(C)	0.50	0.50	0.50	25	10	余	—	7.5
X-63(C)	0.40	—	—	23	10	58	6	—
HS-30								
422-19(C)	0.45	0.60	0.60	26	15	余	6	—
HS-36, L-251(C)	0.40	1.2	0.50	19	10	余	—	15
HE-1049(C)	0.40	0.8	0.8	26	10	余	—	15
HaynesNO 151(C)	0.50	1.0*	1.0*	20	—	余	—	12.7
W-152(C)	0.45	0.50*	0.50*	21	1.0*	余	—	11
NiVCO-10	0.05*	0.35	0.15	—	22.5	余	—	—
HS-21(C)	0.25	0.60	0.60	27	3	余	5	—

* 最高量; *100 及 1,000 小时的断裂; (C) 指铸造合金。

的主要性质

(%)					特有的断裂强度* (1,000 磅/吋 ²)						典型用途
Nb	Ti	Al	Fe	其它	1,200°F 100 小时	1,200°F 1,000 小时	1,500°F 100 小时	1,500°F 1,000 小时	1,800°F 100 小时	1,800°F 1,000 小时	
4	—	—	4	—	60	46	25	18	—	—	喷气式发动机零件、螺栓、弹簧
4	—	—	3	—	56	44	28	21	11	6.5	高温铸件
4	—	—	3	1.0B	86	78	44	32	14.5	7.8	高温铸件
2	—	—	3	—	—	—	23	18	8.5	5	高温用板材
1	—	—	2	—	—	—	30	22	10	—	高温用棒材
—	—	—	—	—	70	54	24	17	7	3.8	喷气式发动机零件、好的板材合金
—	1.0	—	—	—	—	—	25	18	—	—	高温板材合金
—	4.0	—	2	—	95	78	33	24	—	—	燃气轮机零件
Ta 2.0	3.8	—	—	0.02B	—	82	46	33	13	—	喷气式发动机零件、最强的锻制合金之一
—	—	—	1.5	—	56	51	28	22	11.3	9.8	燃气轮机叶片、零件
—	—	—	1.0	—	54	45	24.3	17.7	8	—	燃气轮机叶片、零件
—	—	—	1.0	—	—	—	28.6	21.7	10	7.1	燃气轮机零件
—	—	—	1.0	0.03B	—	—	29	25.5	10.5	7.2	燃气轮机零件
—	—	—	3.0 ^{HK}	0.40B	—	—	45	35	—	—	燃气轮机零件
—	—	—	—	0.05B	73	68	37	33	14	11.5	燃气轮机动叶、静片、正偏转子
2.0	—	—	2.0	—	—	—	—	—	11.5	7.8	燃气轮机零件
—	1.8	0.22	1.0 ^{HK}	1.1Zr	54	43	—	—	—	—	高阻尼的蒸汽轮机叶片
—	—	—	1.0	—	52	42	20	13.5	9.4	7.0	燃气轮机叶片、零件

现将目前美国使用的超合金加工处理和使用性能简略介绍如下：

1. 铁基超合金 包括三类合金：第一类合金是加添钨、钼、铌和钛等形成碳化物的元素使之强化的、成分有所改变的不锈钢类型；第二类合金是可以热处理或沉淀硬化的合金；第三类是较复杂的 Fe-Cr-Ni-Co 合金。以 16-25-6 和 19-9DL 为代表的第二类合金，主要在“中温轧制”(Warm Working) 的情况下使用。在 $1,200 \sim 1,500^{\circ}\text{F}$ (中温) 进行精整，压缩 $20 \sim 40\%$ ，随后在 $1,200 \sim 1,300^{\circ}\text{F}$ 下解除应力，即在 $1,300^{\circ}\text{F}$ 以下具有最适当的使用性能。用固溶和时效处理，能获得 $1,300^{\circ}\text{F}$ 以上长时间使用的较好蠕变和断裂性能。

A-286、Discaloy 和 Incoloy 901 等第二类合金，因热处理而显著硬化，沉淀硬化比半热加工变形的显著优越处是：较高温度使锻造等热加工操作易于进行，并可用较小的设备，而且强化是热处理而不是中温变形的结果，不论大小或形状如何，锻件的性质是比较一致的。添加 $4\% \text{Ti}$ ，能使热处理的 Unitemp 212 合金成为最强的铁基合金之一；添加小量的铌、硼和钼则能推迟过时效。这是这类合金的一个特点。

N-155、S-590 和 Refractalloy 26 等第三类合金，在高达 $1,500^{\circ}\text{F}$ 左右时，一直有改进的氧化抗力和适当的强度。N-155 合金大概是超合金中试验得最多的，其现有数据比其他任何超合金都多。

2. 钴基超合金 不久以前，钴基超合金一直被认为在 $1,600^{\circ}\text{F}$ 以上 (也许能高达 $2,000^{\circ}\text{F}$) 使用时是优越的，因为这种合金在此温度范围内有高强度和优良的氧化抗力。但是现在，可沉淀硬化的镍基合金在这大部分温度范围内有较高强度，而使钴基合金只在约 $1,900^{\circ}\text{F}$ 以上的温度下占优势。

在早期的喷气式发动机中，美国 Haynes-Stellite 公司所发展、精密铸造的 No. 21 钴基合金，是一顶重要的隔板喷嘴叶片用合金。但不久就为较强的 Haynes No. 31 合金和锻造的钴基合金 S-816 所代替。薄板和锻造合金 L-605 (HIS-25) 大概是目前用得最广泛的钴基合金。它用于喷气式发动机的后期燃烧器零件、燃烧器衬垫、喷嘴隔膜叶片和排气锥管组合，并曾用作最高温度达 $2,000^{\circ}\text{F}$ 的 Dyna-Soar 超音速飞机的下翼外板片的结构材料。