



高温合金材料

冶金工业出版社

75.12.14
431
2.3

高温合金金相图谱

《高温合金金相图谱》编写组 编著



高温合金相图谱

《高温合金相图谱》编写组 编著

(内部发行)

•

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

•

787×1092 1/16 印张 14 1/4 字数 283 千字

1979年2月第一版 1979年2月第一次印刷

印数00,001~10,300册

统一书号: 15062·3383 定价(暂四) 3.60元

前 言

建国以来,在毛主席革命路线指引下,随着国民经济和国防工业的发展,我国高温合金发展很快,取得了显著的成绩,初步建立了我国自己的高温合金系统,基本满足了我国航空工业及其它有关部门对高温合金材料的需要。

高温合金是现代航空发动机、舰艇燃气轮机、地面燃气轮机及火箭发动机等所必需的重要金属材料。合金的性能与其组织结构之间有着密切的内在联系;目前国内外对高温合金显微组织结构正在深入研究,随着合金使用寿命的延长,合金的长期组织稳定性也愈来愈受到重视。为了满足高温合金生产、科研、使用部门的迫切需要,由冶金部钢铁研究院、沈阳金属研究所、大冶钢厂、三机部六二一所、北京钢铁学院等单位组成了编写组共同编写了这本《高温合金金相图谱》。

本《图谱》比较系统地、全面地介绍了我国高温合金显微组织的特征;全书分为两个部分:第一部分为总论,简述了合金的分类,合金元素的作用,高温合金显微组织特征及第二相的形成规律和基本控制因素;第二部分为高温合金金相图谱,收集了铁基、镍基变形合金和铸造合金共43个合金牌号的显微组织图片,扼要介绍了合金的成分、热处理工艺和显微组织特征。此外,在本书附录中还列入了高温合金成分、热处理工艺、显微组织一览表和常用腐蚀剂等有关资料。

在编写本书过程中,得到过许多兄弟部门和同志们的大力支持和热情帮助,在此深表谢意。

由于我们水平有限,书中难免有缺点和不受之处,望广大读者批评指正。

《高温合金金相图谱》编写组

一九七七年四月

目 录

总论	1
一、高温合金的分类	1
二、合金元素的基本作用	2
三、高温合金的显微组织	5
四、高温合金中的相	13
五、相形成的基本控制因素及其应用	35
图谱	51
一、变形高温合金金相图谱	51
(一) 铁基变形合金	51
1. GH13 合金	51
2. GH140 合金	53
3. GH15 合金	57
4. GH16 合金	61
5. GH131 合金	64
6. GH36 合金	67
7. GH27 合金	70
8. GH132 合金	73
9. GH136 合金	78
10. GH135 合金	81
11. GH130 合金	84
12. GH302 合金	89
13. GH95 合金	92
14. GH901 合金	96
15. GH169 合金	100
(二) 镍基变形合金	104
16. GH30 合金	104
17. GH39 合金	106
18. GH44 合金	109
19. GH128 合金	112
20. GH170 合金	116
21. GH33 合金	120
22. GH37 合金	124

23. GH143 合金	127
24. GH146 合金	131
25. GH49 合金	134
26. GH118 合金	137
27. GH151 合金	140
二、铸造高温合金金相图谱	143
(一) 铁基铸造合金	143
28. K13 合金	143
29. K14 合金	148
30. 电渣熔铸GH136合金	151
(二) 镍基铸造合金	158
31. K1合金	158
32. K6合金	160
33. K23 合金	164
34. K18 合金	167
35. K38 合金	170
36. K16 合金	174
37. K3合金	177
38. K17、K17G 合金	181
39. K5合金	185
40. DK5 合金	189
41. K19 合金	195
42. K19H 合金	199
43. K20 合金	203
44. K9 合金	206
附录	211
附录一 合金成分、热处理规范及相组成	212
附录二 常用腐蚀剂	218

总 论

一、高温合金的分类

高温合金通常按其用途、工艺和成分分类。

高温合金按其主要用途可分为做导向叶片、涡轮叶片、涡轮盘、燃烧室及其它高温部件的合金，按其生产工艺又可分为变形合金和铸造合金，而按其成分则可分为铁基、镍基和钴基合金。本图谱是按成分和工艺分类的。

1. 铁基合金 铁基合金的成分特点是以铁为主，含有大量镍、铬和其它元素，又可称为Fe-Ni-Cr基合金。根据合金不同的强化类型又可细分为以下四种：

(1) 弱时效硬化型合金：其成分特点是含适量的碳和氮、有弱时效硬化能力，但主要靠钨、钼、铌难熔元素强化固溶体，通常采用热机械加工工艺强化。其成分一般为： $13\sim 20\%Cr$ ， $10\sim 25\%Ni$ ， $0\sim 10\%Co$ ， $3\sim 7\%W + Mo + Nb$ ， $0.2\sim 0.3\%C + N$ 。这种合金加工性能良好，一般只做一些次要零件如紧固件等。

(2) 固溶强化型合金：其成分特点是含铬较高，在 $20\%Cr$ 以上，以获得良好的抗氧化性。含镍约为 $25\sim 40\%$ ，使奥氏体稳定，还含有钨、钼、铌和少量铝、钛、氮等元素，起固溶强化作用。其成分一般为： $19\sim 23\%Cr$ ， $24\sim 40\%Ni$ ， $2\sim 11\%W + Mo + Nb$ ， $0.06\sim 0.12\%C$ ，微量硼、铈、锆，某些合金还有 $0.13\sim 0.30\%N$ 。这种合金的加工性能良好，可以加工成板材做燃烧室材料，使用温度达 $800\sim 900^{\circ}C$ 。

(3) 碳化物时效硬化型合金：其成分特点是含碳较高，并含有钨、钼、铌等强碳化物形成元素。其成分一般为： $13\sim 20\%Cr$ ， $8\sim 25\%Ni$ ， $6\sim 10\%Mn$ ， $3\sim 6\%W + Mo + Nb + V$ ， $0.3\sim 0.4\%C + N + P$ ，微量B、Zr等。这种合金可做涡轮盘及紧固件等部件，使用温度为 $600\sim 650^{\circ}C$ 。

(4) 金属间化合物时效硬化型合金：其成分特点是都含有铝、钛或铌等元素，以形成金属间化合物起时效硬化作用。其成分一般为： $10\sim 16\%Cr$ ， $25\sim 45\%Ni$ ， $1.8\sim 3.5\%Ti$ ， $0.2\sim 2.8\%Al$ ， $3\sim 5\%Nb$ ， $1\sim 3\%W$ ， $1\sim 5\%Mo$ ， $\leq 0.08\%C$ ，微量B、Ce、Zr等。这种合金是做涡轮盘的主要材料，它也可以做涡轮叶片及其它高温部件，使用温度约为 $650\sim 800^{\circ}C$ 。

铁基合金以变形合金为主，我国工人阶级坚持独立自主、自力更生的方针，不仅发展和生产了一批铁基变形合金，而且研制成功了铁基铸造合金。铁基铸造合金一般含硼较高。

2. 镍基合金 镍基合金以镍为基,一般含10~20%铬形成铬镍奥氏体基体,又可称为Ni-Cr基合金,一部分合金还含有10~20%钴形成钴镍奥氏体基体,又可称为Ni-Cr-Co基合金。根据不同强化类型又可细分为固溶强化型合金和以金属间化合物 γ' 相强化的时效硬化型合金。

固溶强化型合金含有大量的钨、钼和少量的铝、钛、铌以强化固溶体,一般钨和钼之和达13~20%。还含有微量硼、铈、锆强化晶界。这类合金多用来做燃烧室部件及其它板材部件,使用温度可达900~1000°C。

金属间化合物强化的时效硬化型合金都含大量的铝、钛、铌和钼,其和达2.7~16%,以形成Ni₃Al型 γ' 相,使产生强烈的时效硬化作用。此外,还含总量高达3~18%的钨和钼,微量硼、铈、锆起强化晶界作用。这类合金多用作涡轮叶片、导向叶片、涡轮盘和其它高温部件。

镍基铸造合金都是以 γ' 相强化的时效硬化型合金,合金化程度比变形合金高,高温强度也比变形合金高。近期的某些铸造合金用钨或调整硼和碳含量的方法来提高中温性能。

以 γ' 相强化的时效硬化型镍基合金的使用温度一般为750~1000°C左右。

3. 钴基合金 钴基合金的基体系以钴为主的钴-镍-铬奥氏体,通常含有大量钨起固溶强化作用,而钛、铈、铌、钼、钨、钼和铬也能形成碳化物以强化合金。其成分一般为:20~25%Cr, 0~20%Ni, 10~15%W, 0~9%Ta, 0.1~1.0%C, 0~2%Zr, 0~1%Ti, 微量B、Y、La等。钴基合金具有良好的抗腐蚀性能和抗冷热疲劳性能,具有较平直的持久—断裂时间—温度参数性能,因此采用钴基合金做某些零件具有独特的优点。

二、合金元素的基本作用

高温合金的化学成分十分复杂,一般包含近十多种合金元素,此外还存在一些不可避免的杂质元素。研究一个合金首先要研究合金成分中主要合金元素的作用,以及它们与合金显微组织和性能之间的内在联系。

图1示出周期表中各个元素与面立方的镍(或铁)之间的相互作用。由图看出,在周期表中与铁、镍相邻的元素,由于原子尺寸、晶体结构和电子层结构相近似,能够组成连续固溶体,稍远离的元素组成有限固溶体或生成化合物,更远离的元素则形成离子化合物,甚至不起作用。因此,高温合金中常用的合金元素有C、N、B、Cr、W、Mo、V、Al、Ti、Nb、Ta、Zr、Hf、Be、Mn、Fe、Co、Ni、碱土、稀土等廿多种,其中大部分元素和面立方的Ni(或Fe)可以形成有限或连续固溶体。当元素含量超过溶解度时,就会生成第二相。一些溶解度较小的元素,如B、Zr、稀土、碱土元素往往在晶界偏聚,起强化晶界作用。某些有害元素(Pb、Sb、Bi、Sn、As、Cd等)也易偏聚于晶界,使晶界弱化。高温合金中合金元素的基本作用可以归纳为以下六个方面:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H	He																He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U												

图 1 与铁、镍形成固溶体的合金元素周期表

I 连续固溶体形成元素

II 有限固溶体及化合物形成元素

III 离子化合物形成元素

IV 非相互作用元素

1. 形成面心立方奥氏体基体的元素——Ni、Fe、Co、Mn。
2. 提高抗氧化和耐腐蚀性的元素——Cr、Al（抗氧化）、Ti（抗热腐蚀）。
3. 固溶强化元素——W、Mo、Cr、N、Al。
4. 碳化物强化元素——C、Cr、W、Mo、V、Nb、Ta、Hf、N。
5. 金属间化合物强化元素——Al、Ti、Nb、Ta、Hf。此外，W能大量进入 γ' 相增强 γ' 相强化作用。

6. 晶界强化元素——B、稀土、碱土、Zr以及Hf、Nb也有这方面的某些作用。

下面进一步简述各合金元素的作用。

1. 固溶强化

高温合金的固溶强化是通过提高原子间结合力，产生晶格畸变，降低堆垛层错能、产生短程序或其它原子偏聚，降低固溶体中元素的扩散能力、提高再结晶温度来强化合金。因此一般讲，溶解度适当、尺寸效应大和熔点高的元素起固溶强化作用较强。表1列出各合金元素在固溶强化各个方面的作用，其中有些元素有促进析出TCP相（拓扑密排相）的作用，对合金性能有害；所以这些元素的含量要合适。

2. 第二相强化

高温合金中的主要时效硬化相是 γ'' · γ^* （金属间化合物）和各类碳化物。以金属间化合物 γ' （或 γ^* ）时效强化时，它们对合金的强化作用主要决定于 γ' （或 γ^* ）的数量、

表 1 元素的固溶强化作用

强 化 因 素	Ⅷ 族			Ⅵ族	Ⅴ 族			Ⅳ族	ⅢB族		
	Ni	Co	Fe	Mn	Cr	Mo	W	V	Al	N	C
形成并稳定奥氏体	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+
提高抗氧化和耐蚀性	+	+	•	•	+	-	•	-	+	•	-
元素的扩散能力	+	+		•	+	+	+	-	•	-	-
产生晶格畸变	随族数差和原子序数差增大而增大									间隙原子作用	
与电子因素有关的强化因素	随 N_V 差增大而增大										
防止析出有害相倾向	+	+	-		-	-	-		-		

(+) 有利作用; (-) 不利作用; (•) 无一定作用。

大小、 γ' (或 γ'') 本身的固溶强化程度、 γ' (γ'') 与基体的错配度、反相畴能大小、 γ' (γ'') 过时效转变等因素。各合金元素在这方面的作用列于表 2。

表 2 以 γ' 相强化合金时元素的作用 (针对 Ni 基合金)

强 化 因 素	合 金 元 素										
	Ni	Co	Fe	Cr	Mo	W	V	Nb	Ta	Ti	Hf
增大 γ' 体积分分数	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	(Fe基)										
增大反相畴能			+	-			-	+	+	- (Ni基) + (Fe基)	+ (Ni基) - (Fe基)
增大 γ' 相本身固溶强化		+	+	+	+	+	•	+	+	+	-
											+
增大 γ' - γ 错配度		-	-	-	-	-		+	+	+	-
											+
促进 γ' 过时效转变						-		+	+	+	-

(+) 有利作用; (-) 不利作用; (•) 无一定作用。

碳化物时效硬化的机理与 γ' 不同。碳化物具有硬而脆的性质, 时效时具有选择性析出的特征。其强化作用与碳化物的类型、数量、大小、分布有关。通常碳化物强化相的数量较少、质点较大、分布不均, 因此往往是位错绕过质点的位错运动机理有效。此外, 晶界碳化物可以起到强化晶界的作用。表 3 归纳了合金元素在这方面的作用。

3. 晶界强化作用

晶界在高温下表现为薄弱环节, 在高温和应力的长时间作用下, 首先在晶界产生裂纹。因此, 提高晶界强度具有重要意义。晶界现象有: 由于晶界和晶内结构上的差异, 出

表 3 碳化物的强化作用

合金元素	Cr	Mo W	V Ti Nb Ta Hf
形成碳化物的类型	Cr ₂₃ C ₆	M ₆ C	MC
强化作用	① 沿位错线析出, 起时效硬化作用。	晶界强化 (高水平镍基合金)	① 沿层错或普通弥散析出, 起强时效硬化作用。
	② 晶界强化 (低、中水平镍基合金)		② 骨架强化 (铸造合金)

现某些溶质元素在平衡条件下偏聚在晶界处的现象, 称为内吸附或平衡偏析。溶质原子与空位交互作用产生平衡偏析; 选择性脱溶产生晶界析出。高温合金中的一些微量元素 (B、稀土、碱土元素) 和一些杂质元素 (Pb、Bi、Sn、As、Cd、Sb、气体元素等) 都是典型的晶界偏析元素。这些元素的平均含量很小, 甚至只有十万分之几, 但是由于偏析, 使晶界区的局部浓度较高, 其结果导致晶界有效强化或严重弱化。为了获得良好的性能, 高温合金必须降低气体和杂质元素。并加入适量的稀土、碱土元素和硼、锆等晶界强化元素。各元素对晶界的作用列于表 4。

表 4 杂质和微量元素的基本作用

元素	低熔点元素 Pb, As, Bi, Sn, Sb, Se, Te 等	气体元素 (H ₂ , O ₂ , N ₂)	硫, 磷	硼, 锆	稀土, 稀土元素 稀土氧化物
主要作用	①因严重的比重偏析, 树枝晶偏析和平衡或非平衡偏析严重损害热加工性和热强性	①晶界偏析产生晶界弱化, 降低热加工性和热强性	①易生成低熔点共晶降低热加工性, 增加脆性	①晶界偏析, 降低晶界扩散, 降低形成晶界裂纹倾向	①去除气体, 纯洁金属
	②以低熔点纯金属或低熔点化合物状态存在于晶界, 削弱晶界强度	②生成夹杂、气泡, 造成疏松	②晶界偏析造成脆化	②形成晶界硼化物颗粒和改善晶界碳化物形态, 强化晶界	②与有害杂质生成高熔点化合物, 提高塑性
		③低温氢脆	③生成硫化物夹杂	③减轻有害杂质作用	③碱土金属能降低形成晶界裂纹倾向
		④氮可能起固溶强化和增强第二相强化的作用	④磷可能增强碳化物时效硬化能力	④提高强度和塑性	④稀土元素有效提高抗氧化性, 稀土氧化物提高抗腐蚀性

三、高温合金的显微组织

1. 高温合金的热处理

在合金成份和工艺确定之后, 热处理就成为改变合金组织的重要手段之一。根据使用

要求, 可以选择适当的热处理制度, 获得良好的组织状态, 以保证优良的使用性能。

变形高温合金的热处理一般由固溶处理、中间处理和最终时效处理组成。各合金的热处理制度见附录一。

固溶处理的目的是得到均匀的过饱和固溶体, 控制一定的晶粒度。固溶处理的温度范围大约在 $980\sim 1250^{\circ}\text{C}$ 之间, 主要根据各个合金中相的析出和溶解规律及使用要求来选择, 以保证主要强化相必要的析出条件和一定的晶粒度。对于高温长时使用的合金, 要求选择较高的固溶温度以获得较大的晶粒度(2~3级), 对于中温使用并要求有高的短时强度和疲劳强度的合金, 要采用较低的固溶温度, 保持较小的晶粒度(5~6级甚至更细)。高温固溶处理时各个相都逐步溶解同时晶粒长大, 低温固溶处理时不仅有主要强化相的溶解, 而且可能有某些相的析出。低温固溶处理不易完全消除原先压力加工的影响。机械热处理是把压力加工与热处理联合起来, 往往没有单独的固溶处理。对于过饱和程度低的合金通常选择较快的冷却速度(如油、水冷等), 对于过饱和程度高的合金通常为空气中冷却。固溶处理后的组织基本上是奥氏体和MC碳化物(包括少量MN, M_3B_2 等), 只有少数合金有某些其它相存在。

中间处理即二次固溶处理或中间时效处理, 目的是改变晶界碳化物状态 and 造成大小两种尺寸的 γ' 相。二次固溶处理温度一般在 $1000\sim 1150^{\circ}\text{C}$ 之间, 保温和冷却过程中于晶界析出链状碳化物, 起强化晶界作用。对于过饱和程度低的合金往往伴随有晶界贫 γ' 区, 对于过饱和程度高的合金往往形成包覆链状碳化物的 γ' 膜, 固溶处理的冷却速度要合适, 例如合适的冷却速度可以获得弯曲的晶界。中间时效处理除改善晶界碳化物析出状态外, 还可以析出部分大尺寸的 γ' 相, 使合金在最终时效后得到大小两种尺寸的 γ' 相, 改善综合性能和长期组织稳定性。对于碳化物时效强化的铁基合金, 一般没有中间处理。

时效处理的目的是使强化相充分而均匀地析出, 时效温度要保证强化相的大小合适, 一般在 $700\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 之间。过饱和程度高的合金, 由于在固溶处理和中间处理的冷却过程中 γ' 相已大量析出, 所以最后的时效处理只产生较小的组织变化。

铸造合金的组织与铸造工艺有密切关系, 许多铸造合金不进行热处理或只进行简单的热处理, 例如只经几小时固溶或时效处理就可使用; 甚至不经过热处理就使用, 随着合金逐渐复杂化, 为了改善某些综合性能也可采用与变形合金相似的多次热处理。铸造合金经过固溶处理能够使铸态组织局部均匀化, 但铸造合金的基本特征, 例如树枝晶、偏析等不会全部消除。固溶处理、中间处理和时效处理的作用与变形合金类似。

2. 各类高温合金的典型显微组织

图2示出镍基合金显微组织随着合金强度的提高而演变的情况。从图看出合金组织由固溶强化的单相奥氏体(含有少量晶界碳化物)演变为用 γ' 相强化的多相合金, 图2a为固溶强化合金, 图2b、c, 为 γ' 相强化的变形合金, 图2d、e、f为铸造合金的组织。对于

固溶强化合金,随着合金强度的提高,合金强化元素的饱和度不断提高,所以长期时效后会有新相析出。以金属间化合物强化的合金,随着合金强度的提高, γ' 强化相的变化包括: γ' 相数量由~10%增加到60~70%; γ' 相形态由球形逐步变为立方形;尺寸逐步变大并且由一种球形的 γ' 相演变为大小两种尺寸的 γ' 共存; γ' 组成中也含有更多的难熔元素Nb、Ta、Hf;等晶界是由两侧有贫 γ' 区的链状碳化物逐步变为有 γ' 膜包覆的链状碳化物;随着合金化程度的提高,组织中出现($\gamma+\gamma'$)共晶;同时铸造合金中的成份和组织不均匀性加剧。为了得到更高强度的合金,发展了定向铸造合金和单晶合金。

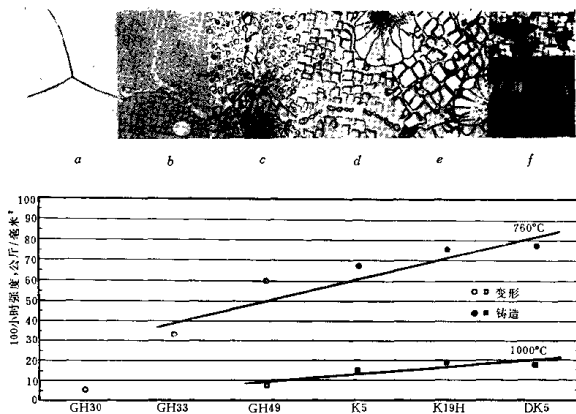


图2 镍基合金的典型显微组织

图3示出铁基和铁镍基合金显微组织随强度提高而演变的情况。

图3a为固溶强化的铁基奥氏体合金,其组织除奥氏体外,还有一些碳氮化物。图3b、c为碳化物时效硬化型铁基合金的组织,强化水平低的合金一般以 $M_{23}C_6$ 为主要强化相,分布不均匀,颗粒较大。强化水平高的合金常以MC为主要强化相,呈弥散、细小质点均匀析出。图3d、e、f为金属间化合物强化的铁基合金,随合金强度的提高,显微组织演变的趋势为: γ' 相的数量由2~3%增加到~20%, γ' 大小保持在150~300Å,形状一直为圆球形;碳化物相由单一的MC到多种晶界碳化物;固溶体过饱和度不断增加,析出Laves和其他相的倾向增大,高度强化的铁基合金一般皆存在Laves相,图3e所示GH130合金组织的晶界相中有Laves相。为了获得高屈服强度,发展了以 γ' 相强化为主的时效硬化合金。

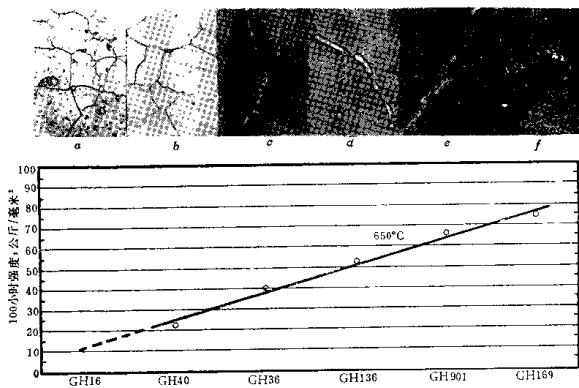


图 3 铁基和铁镍基合金的典型显微组织

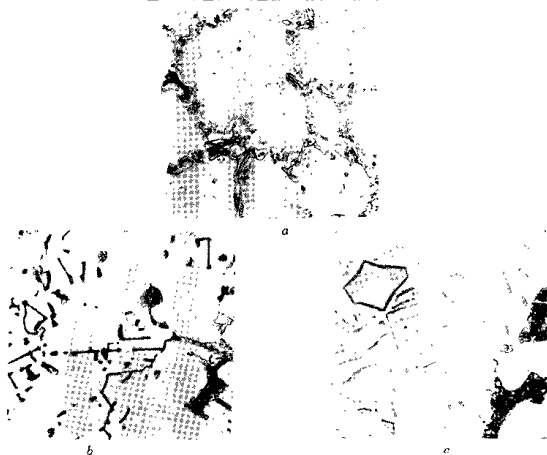
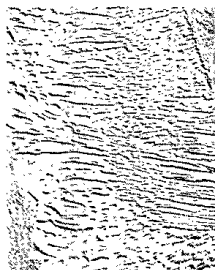


图 4 钴基合金的显微组织*

* 该图引自 C.T.Sims, The superalloys, 1972.

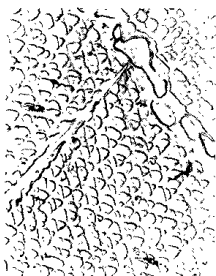
(图3f)。

钴基合金我国研制不多,只简述其显微组织的特征。钴基合金的主要强化相为碳化物,有 MC 、 M_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 、 M_6C 等类型。图 4a 为强度低的钴基合金 X-40,有晶界和枝晶间块状的 $M_{23}C_6$ 、 M_7C_3 和 $(\gamma + M_{23}C_6)$ 共晶,共晶中的 $M_{23}C_6$ 为细片状。图 4b、c 为强度较高的钴基铸造合金的显微组织,特点是有骨架状和块状 MC ,共晶 $M_{23}C_6$ 和块状 M_6C 。



a. 晶界胞状 $M_{23}C_6$

降低持久强度及塑性,用改进热处理制度方法消除



b. 片状 σ 相

脆化合金,降低某些合金的持久强度,
利用相分计算法控制成分及
严格控制铸造合金的铸造工
艺避免产生 σ 相



c. 片(针)状 μ 相

降低强度和塑性, 控制成分以消除
 μ 相

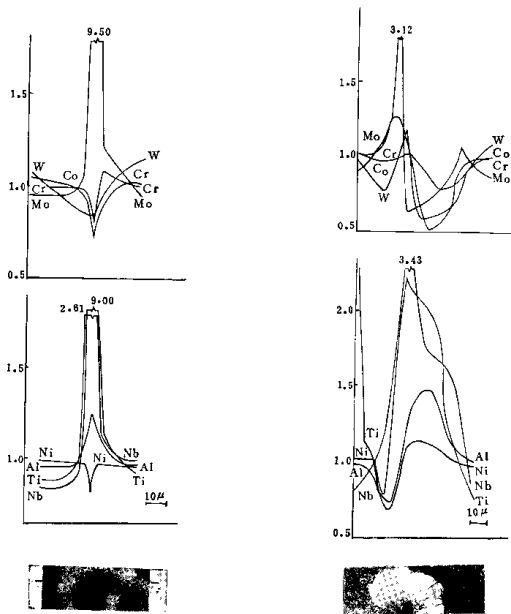
图 5 镍基合金中的有害组织

3. 有害的显微组织

有害组织往往损害合金性能,或降低强度,或增加脆性等等,但在某些特殊条件下,人们可以利用这些组织发挥有利作用。

图5为各类强度水平不同的高温合金中可能出现的主要有害组织。

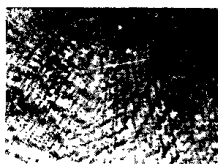
铸造合金不可避免地存在偏析,而偏析又常常起促进有害相析出的作用。图6a、b为用电子探针法研究K19合金的树枝晶偏析和 γ' 共晶偏析的结果,图7为用示踪原子法研究一些试验性镍基合金中元素分布的射线照片。由图可见,W和Co(含量10~20%时)偏聚于



a. K19树枝晶间的合金元素分布

b. K19($\gamma + \gamma'$)共晶附近合金元素的分布

图6 镍基铸造合金中的偏析



a

钨(放射性同位素W-185)的分布照片

合金中钨含量为4%，合金元素钨择优地分布于树枝晶轴上。
微观体积内的定量结果：当合金中平均钨含量为4%时，在晶干或一次轴上钨的相对含量为5.0%；二次枝晶轴上为4.2%；枝晶间上含量为2.9%。



b

铌(Nb-95)的分布照片

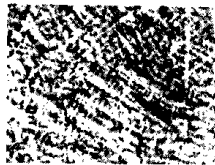
合金中铌含量为1.5%，照片表明铌的富集部位相当于树枝间。定量结果：当合金中平均铌含量为1.5%时，枝晶间上铌的相对含量为1.8%；晶轴为0.6%。



c

锆(Zr-95)的分布照片

合金中锆含量<2%，锆择优分布于树枝晶体和晶粒的间界



d

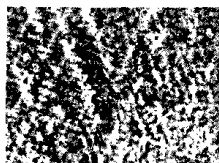
铬(Cr-51)的分布照片

沿沿枝晶间分布



e

锑(Sb-125)的分布照片



f

锡(Sn-113)的分布照片

合金中杂质元素锡(Sn-113)和锑(Sb-125)的含量低于0.02%；均沿枝晶间分布

图7 “示踪原子”法研究合金元素在镍基铸造合金中分布的射线照片