

K6铸造镍基高温合金

K6合金题目组

K6合金是在美国GMR-235D基础上研制的一种铸造镍基高温合金。我们于1965年开始研制，主要性能达到设计要求，1966年作为国内第一个以铸代锻的高温合金，推荐给涡喷型发动机制造一级涡轮叶片，经过230多小时试车考验，情况良好。K6合金还曾作为其它发动机的涡轮叶片和导向叶片，通过试车或试飞考核。近几年来，为使K6合金用作大型客机的发动机二、三级涡轮叶片，我们着重对合金的长时性能、工艺性能以及使用性能作了进一步的研究。

一、合金的化学成分

K6合金的化学成分见表1。该合金化学成分简单，不含贵重稀缺的合金元素。

K6合金中的合金元素可分为三类，即固溶强化元素Cr、Mo；第二相沉淀强化元素Al、Ti和晶界强化元素C、B、Zr等。K6合金中Cr含量比较高，能在合金表面形成 Cr_2O_3 氧化膜，防止氧向合金内部扩散，使合金具有良好

的抗氧化和抗腐蚀能力。Al、Ti在合金中主要形成有序面心立方金属间化合物 $\gamma'-\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ，起沉淀强化作用，Al还可在合金表面形成致密的尖晶石型氧化物，增强合金的抗氧化能力。一般来说，随着Al+Ti总量增加，K6合金中 γ' 相数量增加，高温强度提高，塑性降低。因此，为保证合金强度和塑性有比较好的配合，Al+Ti总量应控制在6.0~6.8%范围内。由于K6合金Al+Ti量比GMR-235高1.2%， γ' 数量多10~15%，所以持久寿命比GMR-235高出近50%。C和B在K6合金的晶界和枝晶间形成网络状碳化物共晶组织，起到强合金的作用。B和Zr在晶界易与有害元素结合，净化晶界。B对K6合金的疲劳性能有良好的影响，随着B含量增加，合金的疲劳强度提高。当合金的B含量为0.069%时， $\sigma_{-1}^{700^\circ\text{C}} = 28$ 公斤/毫米² ($N > 10^7$)；当合金的B含量为0.097%时， $\sigma_{-1}^{700^\circ\text{C}} = 31$ 公斤/毫米² ($N > 10^7$)。

表1 合金的化学成分

合金元素	C	Cr	Mo	Al	Ti	B	Zr	Fe	Si	Mn	Ni
重量，%	0.10/0.20	14.0/17.0	4.5/6.0	3.25/4.0	2.0/3.0	0.05/0.10	≤0.10	≤5.0	≤0.30	≤0.10	余

二、合金的显微组织

K6合金具有一般铸造镍基高温合金显微组织的特点，主要由四种相组成： γ 固溶体； γ' [$\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$] 沉淀强化相；MC型碳化物； M_3B_2 型硼化物。此外，在热处理状态下还会出现少量的 M_{23}C_6 型碳化物。图1为K6合金的典型组织，

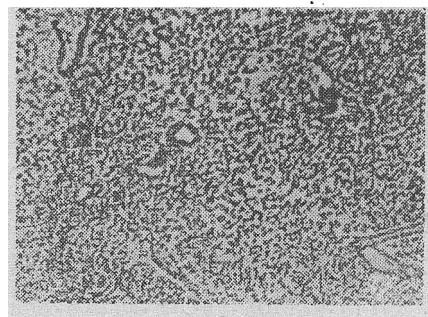


图1 K6合金的典型组织 600×

1. γ 固溶体

K6合金基体—— γ 固溶体是面心立方结构的奥氏体组织。 γ 量约为62~67%，是合金中最基本最重要的相。它主要由Ni-Cr-Mo等元素组成，溶解有一定量的Al、Ti、C等元素。其化学组成如表2。基体 γ 使合金具有较高的强度，一定的抗氧化和抗腐蚀能力。

表 2 K6合金中各相的化学组成

名 称	元 素 含 量, 重 量 %							
	Ni	Cr	Mo	Ti	Al	C	B	Zr
合 金	73.06	15.70	5.17	2.26	3.51	0.12	0.081	0.097
γ 固 溶 体	70.99	19.98	6.24	0.61	2.16	—	—	—
γ' 沉 淀 相	84.19	3.21	0.61	5.06	6.92	—	—	—
MC 型 碳 化 物	—	4.99	34.91	43.64	—	16.46	—	—
M_3B_2 型 硼 化 物	5.69	33.90	50.85	—	—	—	9.20	—

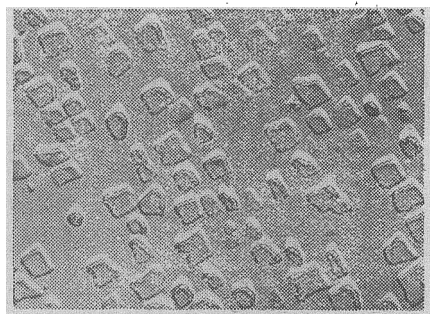


图 2 K6合金 γ' 相的电镜照片

6500 \times

$(Ni_{2.90}Cr_{0.09})(Al_{0.64}Ti_{0.25}Mo_{0.02}) \approx Ni_3(Al, Ti)$

K6合金中 γ' 相以两种形态存在。一种是直接从液体中析出的一次 γ' 称为 γ' ($\gamma + \gamma'$)共晶组织。在金相显微镜下常呈花朵状，在电镜下呈放射状。这种 γ' 共晶组织在合金中数量不多，对性能影响不大。另一种是在冷却或热处理过程中，从固溶体中沉淀析出的二次 γ' 相。这种 γ' 相尺寸一般比较小，其电镜照片见图2。K6合金中 γ' 形态基本上是立方体形，也有呈四片组成“田”字形状。

3. MC型碳化物

K6合金中碳化物主要是MC型。在980℃ \times 5小时空冷热处理后，发现有少量的 $M_{23}C_6$ 型。MC量约为1.5%。MC型中“M”主要是Ti、Cr、Mo和Zr。它的化学组成见表2，化学式为： $(Ti_{0.30}Mo_{0.29}Cr_{0.41}Zr_{0.006})C$ 。

这种MC型碳化物是在凝固过程中形成的，

2. γ' 沉淀强化相

γ' 相是K6合金中一个十分重要的强化相。合金的热强性在很大程度上取决于 γ' 相的本质以及数量、大小、形态和分布。在一定范围内， γ' 相越多，强度越高。K6合金中 γ' 数量为30~37%。 γ' 相的化学组成见表2。由表2可知， γ' 相中Al、Ti量较高，而Cr、Mo量较少。 γ' 相的化学式如下：

是一种稳定的具有面心立方点阵的碳化物。MC型碳化物多数以点条状或颗粒状分布于晶界和枝晶间，也有存在于晶内的，见图3。

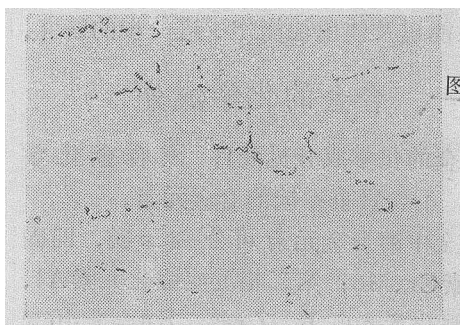


图 3 K6合金MC型碳化物

200 \times

4. M_3B_2 型硼化物

K6合金中 M_3B_2 和MC组成骨架状碳硼化物共晶组织，是一个很重要的相(图4)。它在初熔温度前是十分稳定的。K6合金中 M_3B_2 量约为0.5%，它的化学组成见表2，化学式如下：

$(Cr_{0.64}Mo_{0.15}Ti_{0.09}Ni_{0.20})_3B_2 \approx M_3B_2$

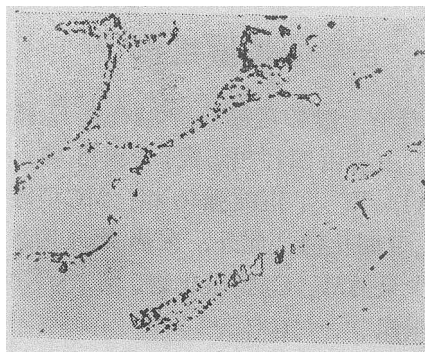


图 4 骨架状碳硼化物共晶组织

500 \times

碳化物的形态和分布是影响K6合金高温塑性的一个重要因素。生产实践表明,当合金凝固时冷却速度比较大时,碳化物共晶以细小颗粒状均匀分布在晶界和枝晶间,并呈网络状,有利于“锁住”晶界,减少过量滑移,可使合金获得良好的强度和塑性。相反,当冷却速度比较缓慢时,碳化物共晶以粗大块状或沿晶界呈膜状分布,易引起局部应力集中,一旦出现裂纹,就以较快速度发展,以致过早断裂。因此,控制好生产工艺是十分重要的。

三、合金的组织稳定性

对于长期工作的高温部件,合金在长时应力下的组织稳定性是一个很重要的问题。根据相分计算,K6合金的平均电子空位数 $\bar{N}_v=1.84\sim1.87$ 。远远小于平均电子空位数2.52这一临界值,不可能出现有害的TCP相,从而认为K6合金的组织将是相当稳定的。长期时效试验和长期试车叶片的组织分析证明了这一点。

1. 长期时效对K6合金性能的影响

应力时效对K6合金800℃瞬时性能的影响列于表3。由表可见,没有发现K6合金有时效脆化现象。长期无应力时效对合金瞬时性能的影响见图5。由图可见,随着时效温度的升高和时效时间的延长,800℃瞬时强度比原来未时效的有所降低,但仍符合技术条件要求,而塑性却有所增加。长期无应力时效后的持久寿命变化不大。

表3 应力时效对K6合金瞬时性能的影响

合金状态	800℃瞬时性能		
	σ_b 公斤/毫米 ²	δ %	ψ %
800℃, 25公斤/毫米 ² 200小时时效	71.1	14.0	15.7
铸态	80.5	5.0	5.9
650℃, 60公斤/毫米 ² 2250小时时效	81.0	8.72	9.18
980℃×5小时, 空冷	83.3	3.76	6.13

2. 长期时效对K6合金组织的影响

(1) γ' 相的变化

γ' 相在长期时效后数量稍有增加,尺寸略有增大。例如,750℃时效3000小时后, γ' 相

量为34%,而未时效的 γ' 相数量仅为31%。随着时效温度的提高, γ' 相析出加快。650℃时效2000小时以上在 γ' 之间又析出细小的 γ' (图6)。750℃以上时效后, γ' 颗粒有集聚长大的倾向,应力促使 γ' 相呈一定方向集聚长大。

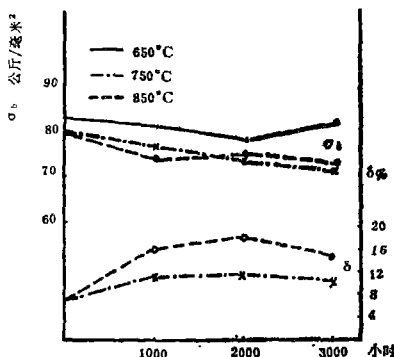


图5 长期时效后瞬时性能的变化

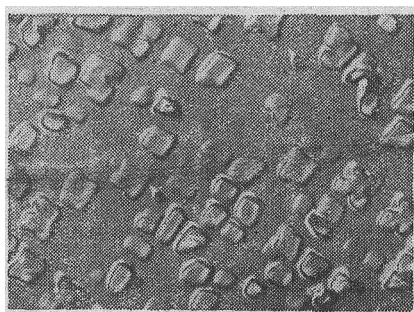
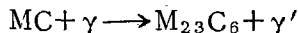


图6 650℃, 2000小时时效后析出细小的 γ'
6500×

(2) MC型碳化物的变化

在长期时效过程中,MC型碳化物不断分解。随着时效温度的提高,分解加速,应力加速MC的分解过程(图7)。MC型碳化物分解按下列方式进行:



这种碳化物反应产生的 $M_{23}C_6$ 和 γ' 对合金的性能有重要作用。碳化物阻碍晶界滑移,围绕着碳化物的 γ' 较软,使晶界处于一定塑性

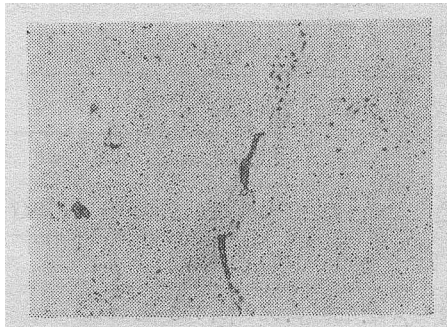


图7 850℃, 19公斤/毫米², 1229小时时效后MC基本上分解成 $M_{23}C_6$
700×

状态，在高温蠕变应力作用下，晶界区域发生一定程度的应力松弛，避免了应力过分集中，延长材料的寿命。

(3) M_3B_2 型硼化物的变化

随着长期应力和无应力时效温度的升高和时间的延长， M_3B_2 型硼化物的点阵常数略变大，形状由骨架状趋向球粒状。

综上所述，不论在理论上，还是在实践中都证明K6合金长期时效后的组织是稳定的，不会出现TCP相，也不产生脆性倾向，完全适合于长期使用。

四、合金的全面性能

1. 物理性能

- (1) 熔化温度范围：1260~1345℃。
- (2) 比重 γ ：8.03~8.05克/厘米³。
- (3) 弹性模量：不同温度下的K6合金弹性模量E见图8。
- (4) 线膨胀系数 α 随温度的变化见表4。
- (5) 导热系数 λ 与温度的关系见表5。

2. 机械性能

- (1) 瞬时性能：不同温度的瞬时性能见图9。
- (2) 冲击性能：室温 a_K 值为0.96~1.49公斤·米/厘米²。
- (3) 持久性能：K6合金的持久强度曲线（L—M曲线）见图10。
- (4) 蠕变性能见表6。
- (5) 机械疲劳性能列于表7。
- (6) K6合金冷热疲劳性能列于表8，采用高频加热和水冷方法测定。由表可见，K6合金的冷热疲劳性能在国内铸造高温合金中是较好的，

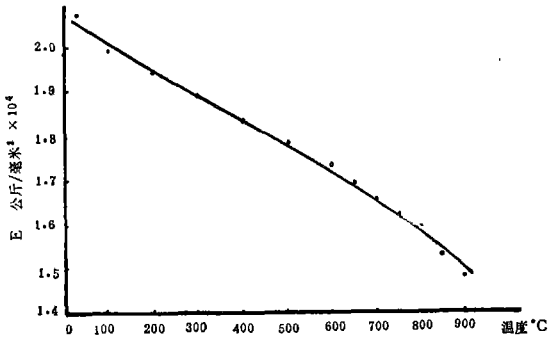


图 8

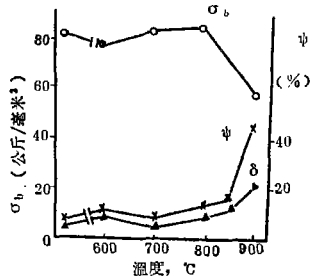


图 9

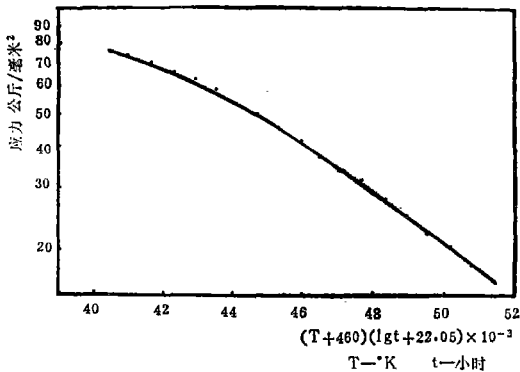


图 10

表 4 K6合金线膨胀系数

试验温度 °C	20/100	20/200	20/300	20/400	20/500
线膨胀系数 $\alpha \times 10^{-6} 1/^\circ C$	11.82	12.44	12.94	13.30	13.59
试验温度 °C	20/600	20/700	20/800	20/900	
线膨胀系数 $\alpha \times 10^{-6} 1/^\circ C$	13.93	14.27	14.82	15.48	

表 5 K6合金的导热系数

试验温度 °C	100	200	300	400	500
导热系数 λ 卡/厘米·秒·°C	0.033	0.036	0.043	0.046	0.047
试验温度 °C	600	700	800	900	
导热系数 λ 卡/厘米·秒·°C	0.050	0.054	0.058	0.061	

表 6 K6合金的蠕变性能

状 态	试验温度 °C	蠕 变 性 能		
		σ 公斤/毫米²	τ 小时	残余 变形 %
980°C × 5 小时, 空 冷	800	>23	100	0.2
	900	>16	100	0.2

表 7 K6合金的机械疲劳性能

试验温度 °C	试样尺寸 毫米	σ_{-1} , 公斤/毫米 ² , $N > 10^7$	
		光滑试样	缺口试样
550	$\phi 4$	36(38)	32(36)
650	$\phi 4$	40(43)	35(40)
750	$\phi 4$	38(43)	32(35)
700	$\phi 9.5$	28~30	

注：括号内数值为喷丸后所测。

表 8 几种合金冷热疲劳性能

合金	试验温度 °C	第一次出现裂纹的平均次数
K6	20~1000	69
K5	20~1000	32
K3	20~1000	32
K17	20~1000	80
K18	20~930	25/50

(7) 硬度：K6合金经980°C×5小时，空冷处理后的室温硬度为35~38Rc。

3. 抗氧化性能

由表9可知，K6合金的抗氧化性能是比较好的，在1000°C以前是抗氧化的。

表 9 几种合金抗氧化性能比较

合金	试验条件	增重 克/米 ² 小时		试验时间, 小时			
		25	50	75	100		
K3	1000°C, 空气	0.14	0.11	0.088	0.077		
K6	1000°C, 空气	0.591	0.394	0.343	0.327		
K17	1000°C, 空气	1.42	1.60	1.63	1.78		

4. 抗燃气腐蚀性能

K6和IN738在同一试验条件(燃油为10#柴油含S0.1%, 空气成分: CO0.1~0.2%, CO₂8~12%, O₂8~12%)下的抗燃气腐蚀性能的比较列于表10。由表可见, K6合金腐蚀失重比IN738还少, 可见K6合金的抗燃气腐蚀性能是比较好的。

表 10 K6和IN738抗燃气腐蚀性能比较

合金	试验温度 °C	失重, 毫克/厘米 ²			
		100小时	300小时	400小时	500小时
K6	850	1.31	2.06	2.37	2.93
IN738	850	1.76	—	2.52	3.55

5. 合金的焊接性能

几种铸造高温合金的焊接裂纹倾向性列于表11。数据表明, K6合金的焊接裂纹倾向性比较小, 说明K6合金的焊接性能是比较好的。

表 11 几种高温合金焊接裂

纹倾向性比较

合金	K6	K14	K3	K19
焊接裂纹倾向性, 裂纹长/焊缝长, %	25.3	34.2	35.3	47.3

6. 机械加工性能

K6合金可用高速钢, 碳化钨类型硬质合金刀具加工。

五、结束语

K6铸造镍基高温合金通过十几年来来的不断研究和实际使用考验, 表明它完全适用于工作温度为850°C, 持久应力为28公斤/毫米², 寿命大于100小时或持久应力为19公斤/毫米², 寿命大于1000小时的涡轮叶片、导向叶片以及其它高温部件。

综上所述, K6合金具有下列特点:

1. K6合金具有较好的综合性能。持久性能很稳定。机械疲劳和冷热疲劳性能在国内铸造镍基高温合金中是较好的。由于合金中Cr、Al量较高, 故抗氧化和抗燃气腐蚀能力也较好。

2. 合金组织稳定, 在长时负载下工作, 不会出现TCP有害相。

3. 合金具有良好的工艺性能。熔炼工艺较易掌握; 铸造性能好(流动性好, 易成型, 疏松少, 热裂倾向小), 易切削加工; 焊接性能在铸造高温合金中也是比较好的。

4. 合金成分简单, 不含有贵重稀缺的合金元素, 如Co、Nb、Ta、Hf等, 资源可完全立足于国内, 价格较便宜。

但是, K6合金也还存在一些问题, 如合金采用普通方法磨削时, 易产生磨削裂纹(可用缓进磨削工艺解决)等, 需进一步研究解决。

(麻立洪, 全有莹执笔)