

细晶铸造 K403 合金热处理工艺的研究

Study on Heat Treatment Processing of K403 Fine Grain Casting

韩 梅 (北京航空材料研究院, 北京 100095)
HAN Mei (Insitute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 研究了固溶处理温度对细晶铸造 K 403 合金的组织 and 性能的影响, 最终确定热等静压后合适的热处理制度为: 1180[±] 10 / 4h+ 980 / 6h。
关键词: 铸造高温合金; 细晶铸造; 热处理
中图分类号: T G 132. 3⁺ 2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 10-0045-03

Abstract: The influence of solution temperature on the microstructure and mechanical properties of fine grain casting (FG) K403 and the suitable heat treatment regime, after HIP has been determined. The result is 1180[±] 10 / 4h+ 980 / 6h.
Key words: casting superalloy; fine grain casting; heat treatment

K403 合金是一种铸造镍基高温合金, 自 20 世纪 60 年代以来, 广泛用于铸造涡喷、涡浆、涡轴和涡扇等系列发动机的导向叶片和工作叶片, 但在某发动机的试车中, 却发生了 K403 合金叶片断裂事故, 所有叶片全部被毁, 在事故分析中发现普通铸造 K403 合金在铸态使用时, 中温 750 / 645M Pa 下的持久断裂寿命很难达到航标 HB5155 的要求。而许多发动机低压涡轮叶片是在中、低温条件下工作, 因此中温性能显得尤其重要。为解决这个问题, 决定采用细晶铸造工艺生产 K403 叶片。因为, 用此种工艺获得的细晶铸件, 可以大大改善铸件中、低温使用条件下的力学性能, 特别是低周疲劳性能^[1]。

一般情况下获得 K403 合金细晶叶片是采用控制参数法细晶铸造工艺, 用此种工艺获得的细晶叶片内部存在较为严重的显微疏松, 需进行热等静压 (HIP) 处理来消除它, 但此后, 其内部显微组织一般不能满足获得最佳中温力学性能的要求, 因此需进行热处理以进一步改善其组织。本文主要介绍细晶铸造 K403 合金 HIP 后热处理制度的研究结果。

1 试验方法

实验选用的 K403 合金锭是 50% 新料加 50% 返回料, 成分如表 1 所示。

合金重熔浇注在自行研制的 ZGX- 25 型细晶铸造真空炉进行, 用控制参数法工艺浇注 K403 合金低压涡轮细晶叶片和细晶力学性能试棒, 晶粒度按 ASTM E112- 8 进行评级, 细晶叶片的晶粒度控制在

ASTM 3~ ASTM 9 级, 浇注 ASTM 00 和 ASTM 2 两种等级的细晶力学性能试棒。

表 1 试验用 K403 合金的化学成分 (wt%)
Table 1 Chemical compositions of K403 alloy (wt%)

C	Cr	Co	W	Mo	B	Al	Zr
0. 16	11. 11	5. 12	5. 07	4. 08	0. 018	5. 58 ~ 5. 63	0. 045
Ce	Fe	Si	S	P	Mn	Ti	Ni
0. 01	0. 68	0. 07	0. 001	0. 006	< 0. 05	2. 49 ~ 2. 59	余

热等静压设备由瑞典生产, 型号为 QIH16。热处理设备为 KO- 9 和 WIG30G 真空淬火炉。

由于 K403 合金低压涡轮细晶叶片在机械加工之后, 要进行固体渗 Al 涂层处理, 制度为 980 / 6h, 相当于叶片经过 980 / 6h 的时效处理。为了保证力学性能试棒的显微组织符合叶片内部的显微组织, 力学性能试棒也要经 980 / 6h 的时效处理。此外固溶处理的时间一般为 4h, 因此本研究的主要目的是选择合适的固溶温度, 以获得最佳的中温力学性能。试验中设计了三种固溶温度: 1180 , 1190 和 1200 。

用金相试样经不同的固溶温度加以处理, 观察其组织形态, 通过组织形态选出固溶温度的合适范围, 此后在该固溶温度范围内处理力学性能试棒, 测定其力学性能, 包括 800 和 750 持久寿命、800 高温瞬时拉伸性能和 690 低周疲劳性能。低周疲劳试验在 MTS- 809 电液伺服闭环回路 JBM 计算机控制系统上进行, 控制轴向应变, = 0. 35%, 三角波形, R = - 1, 频率 1Hz。最后根据力学性能来确定最终的固

溶温度。

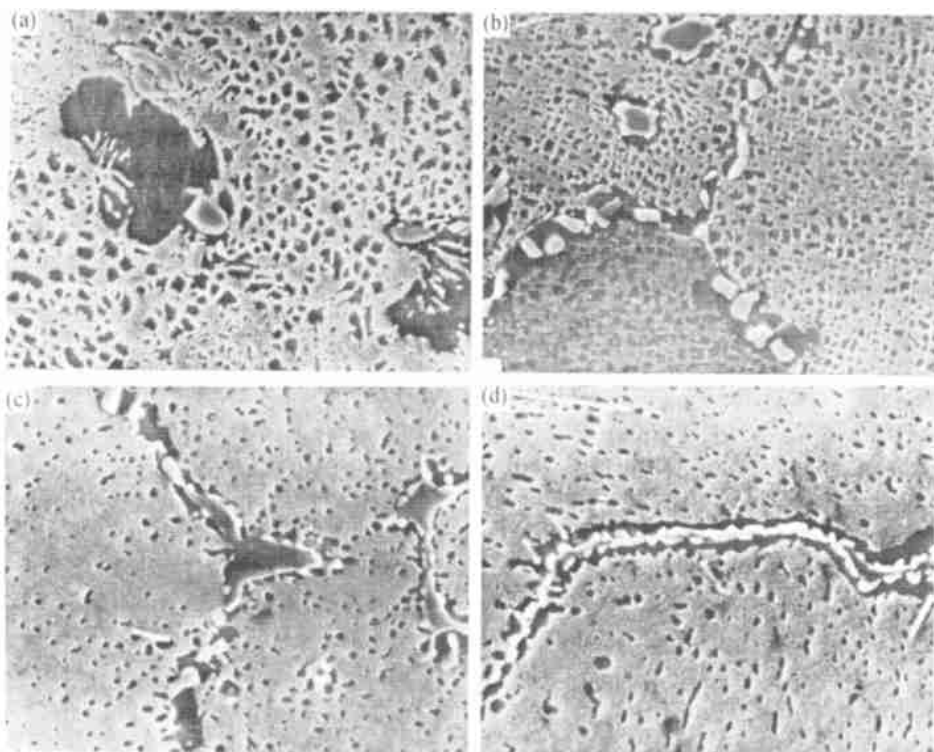
2 实验结果

2.1 固溶温度对细晶铸造 K403 合金组织的影响

先前的研究表明, K403 合金经 1210 /4h 固溶处理后, 相全部溶解而后析出细小的 相, 能获得好的高温性能, 但中温性能不好。因此为了获得好的中温力学性能, 固溶温度应重新选择在 1210 以下。

试验首先用金相试样, 在 HIP 处理后, 分别进行 1180 , 1190 , 1200 固溶处理, 观察三个固溶温度处理后的显微组织, 并和只进行 HIP 处理后的组织进行比较。发现, 只进行 HIP 处理后的组织, 其 相

只有一种形态, 均为粗 相, 如图 1a。而经 1180 , 1190 , 1200 固溶处理后的组织中, 有粗细两种尺寸的 相, 即均为不完全固溶处理。固溶处理时, HIP 状态下的部分 固溶, 冷却后以更细的 形态析出, 但仍保留部分未固溶的粗 , 结果形成尺寸悬殊的粗细两种 相混合组织。随着固溶温度的提高, 固溶的量增多。其中 1180 , 1190 固溶处理时, 晶界由块状 MC 碳化物、颗粒状 M₆C 碳化物和 相组成, 晶界呈链状咬合状, 如图 1b, c。而 1200 固溶处理时, 晶界碳化物 MC 和 M₆C 与 咬合状态不好, 有薄膜化倾向, 如图 1d, 这种晶界形态对中温性能有不利影响, 显然这一温度不宜选用。从而可将固溶温度范围



(a) HIP 处理; (b) HIP+ 1180 固溶处理; (c) HIP+ 1190 固溶处理; (d) HIP+ 1200 固溶处理

图 1 细晶铸造 K403 不同状态的显微组织 800 ×

Fig. 1 Microstructure of FG K403 under different condition

确定在 1180 ~ 1190 。

2.2 固溶温度对细晶铸造 K403 合金力学性能的影响

为了进一步确定固溶温度, 分别测定经 HIP+ 1180 /4h+ 980 /6h, HIP+ 1190 /4h+ 980 /6h, HIP+ 980 /6h 处理后的细晶铸造试棒的持久寿命、瞬时拉伸性能和低周疲劳性能, 如表 2 和表 3 所示。

由表 2 可以看出, 普通铸造 K403 合金 750 /

645MPa 下的持久寿命仅为 69h, 远远低于细晶铸造 K403 合金的持久寿命, 细晶铸造 K403 合金的持久寿命是普通铸造的 4.9 ~ 5.9 倍。细晶铸造 K403 合金的持久寿命和瞬时拉伸性能均远远超出航标的要求, 这一事实说明细晶铸造可以大幅度地提高 K403 合金的中温性能。

从表 2 还可以看出, 细晶铸造 K403 合金在经 HIP 处理后, 再经固溶处理, 无论是 800 还是 750 持久寿命均较不经固溶处理的有大幅度的提高, 其中

表 2 细晶铸造 K403 合金不同状态下的持久性能和瞬时拉伸性能

Table 2 Mechanical properties of FG K403 alloy under different condition

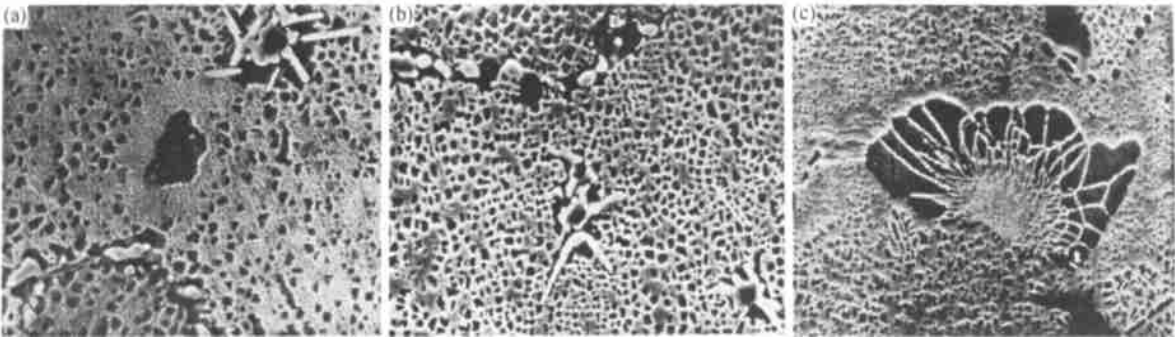
试样状态	晶粒度	持久寿命 t/h		800 瞬时拉伸		
		800 / 510MPa	750 / 645MPa	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/MPa$	$\delta_5/\%$
细晶铸造+ HIP+ 1180 / 4h+ 980 / 6h	AST M00	274	409	1036	902	7.0
细晶铸造+ HIP+ 1190 / 4h+ 980 / 6h	AST M00	273	401	1023	897	5.9
细晶铸造+ HIP+ 980 / 6h	AST M00	205	337	996	857	7.1
普通铸造铸态	AST M7	—	69	—	—	—

表 3 细晶铸造 K403 合金不同状态下的 690 低周疲劳性能

Table 3 LCF life at 690 for FG K403 alloy under different condition

试样状态	晶粒度	低周疲劳寿命 $N_f/次$
细晶铸造+ HIP+ 1180 / 4h+ 980 / 6h	AST M2	8414
	AST M00	6425
细晶铸造+ HIP+ 980 / 6h	AST M2	6942
	AST M00	5508
普通铸造+ 980 / 6h	AST M7	2104

800 持久寿命提高了 33.7%，750 持久寿命提高了 21.4%，而 800 瞬时拉伸性能也有相应的增长。这是由其显微组织决定的，从图 2a 中可以得知，细晶铸造 + HIP+ 1180 / 4h+ 980 / 6h 制度下的显微组织特点是：在晶内存在有粗细两种不同尺寸的 相，这种粗细两种不同尺寸的 相混合在一起可大大提高中温持久性能。从图 2b 中可以看出，不加固溶处理的细晶铸造+ HIP+ 980 / 6h 制度下只有一种粗 ，该相甚至比铸态如图 2c 的还粗，这种组织对中温持久性能是不利的。



(a) 细晶铸造+ HIP+ 1180 / 4h+ 980 / 6h 制度下的组织；(b) 细晶铸造+ HIP+ 980 / 6h 制度下的组织；(c) 铸态组织
图 2 两种热处理制度下的细晶铸造 K403 合金显微组织 (800×)

Fig. 2 Microstructure of FG K403 alloy under two heat treatment regimes

因此，K403 合金细晶铸件在热等静压处理后最好再经固溶处理。从表 2 的数据还可得知，1180 和 1190 两种固溶处理后的性能非常接近，说明两种固溶温度都可行，综上所述，可将固溶温度控制在 1180^{+10} 。
从表 3 可以看出，细晶铸造 K403 合金其 690 低周疲劳寿命是普通铸造的 3~4 倍。在相同热处理制度下，晶粒越细，低周疲劳寿命越长，晶粒度等级为 ASTM 2 级的低周疲劳寿命比 ASTM 00 级的长 26%~31%。对于相同晶粒度等级的试样，经 1180 处理的试样其低周疲劳寿命与不经固溶处理的试样相比，提高了 16.6%~21.2%。因此对于低周疲劳性能而言热等静压处理后最好也经过 1180 固溶处理。

3 结论

晶内有粗细混合的弥散 相、晶界上 与碳化物呈咬合状分布的组织状态有利于细晶铸造 K403 合金的中温持久性能。试验确定了细晶铸造 K403 合金热等静压后的最佳热处理制度为 $1180^{+10} / 4h + 980 / 6h$ 。

参考文献

[1] 刘发信等. 航空材料学报, 1996 (2): 31.
收稿日期: 2001-07-05; 修订日期: 2001-08-12
作者简介: 韩梅 (1973-), 女, 助理工程师, 研究方向: 细晶精密铸造工艺, 联系地址: 北京 81 信 1 分箱 (100095)。