

均匀化和均匀化后处理对 GH742 合金  相的影响

Effect of Homogenization and Post-homogenization Treatment

on  $\gamma$ -phase of GH742 Alloy Ingot

李  伟, 梁学锋, 谢永军, 缪宏博  
(北京航空材料研究院, 北京 100095)

LI Wei, LIANG Xue-feng, XIE Yong-jun, MIAO Hong-bo  
(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 采用电子探针(EPMA)对 GH742 铸锭未经任何处理和均匀化后两种状态下的主要合金元素做了定量分析, 并使用 SEM 扫描电镜对 GH742 铸锭三种不同状态下  相作了比较。结果表明: 铸锭原始态存在偏析,  相在枝晶间和枝晶干处形状、尺寸差别较大, 总体上尺寸较小; 经均匀化后无粗大  相存在; 均匀化后特殊处理部分  相尺寸增大, 热加工塑性有明显提高。

关键词: GH742 合金; 显微组织;  相; 热加工  
中图分类号: TB302.4  文献标识码: A  文章编号: 1001-4381(2005)12-0033-04

**Abstract:** The main alloy elements were analyzed quantificationally by EPMA method, and the  $\gamma$ -phase of GH742 ingot in three states were also compared by SEM method. The results showed that GH742 ingot without any treatment existed segregation, and the  $\gamma$ -phase was fine with great difference in shape and size between the interdendrite areas and the dendrite arm areas. There was no coarse  $\gamma$ -phase after homogenization. While the post-homogenization special treatments made a portion of  $\gamma$ -phase coarse, and the hot-working plasticity was increased remarkably.

**Key words:** GH742 alloy; microstructure;  $\gamma$ -phase; hot-working

GH742 合金是一种合金化程度较高的镍基变形高温合金。自 GH742 合金研制以来, 由于合金化程度的提高, 成分不均匀性增大, 同时, 合金的高温强度提高, 热加工塑性降低, 本工作研究了一种改善合金热加工塑性的微观组织。

相是其主要的强化相, 在某一个尺寸具有最大的强化效果, 当尺寸增大时, 其强化效果会迅速降低, 另一方面  相主要是由 Ti, Al, Nb 等元素形成, 大量的  相的形成降低了固溶于基体中的 Ti, Al, Nb 元素, 从而降低了这些元素产生的固溶强化作用<sup>[1]</sup>。基于这个原理, 为提高 GH742 合金的加工塑性, 本工作调整  相的尺寸大小。由于很高的合金化, GH742 合金铸锭存在着偏析, 所以先对铸锭进行了均匀化处理, 在随后冷却到  相的析出温度范围内降低冷却速度来得到粗大的  相。

1 实验部分

实验用料为抚顺钢厂生产的 210395 炉 GH742 合金 400mm 铸锭, 冶炼工艺为真空感应熔炼+ 真空自耗, GH742 合金的化学成分见表 1。

表 1  GH742 合金化学成分

Table 1  The chemical composition of GH742 alloy

Element	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
Mass fraction/ %	0.054	0.07	0.02	0.0015	0.004	14.15	Bal	5.03

Element	Ti	Al	Nb	W	Fe	V	La	Co
Mass fraction/ %	5.58	2.48	2.62	< 0.2	0.16	< 0.2	< 0.02	10.40

GH742 合金存在枝晶偏析, 实验采用电子探针对未经任何处理的铸锭和经 1160  16h 均匀化后的主要元素做了定量分析, 比较了 GH742 铸锭没经任何处理、均匀化和均匀化后经特殊处理后  相的形状和尺寸大小。均匀化后特殊处理是指铸锭在 1160  16h 均匀化处理后炉冷到 1100  , 在 1100~ 1050  范围内以较慢的速率冷却, 随后炉冷到室温。

比较了原始态和经均匀化特殊处理后两种状态下的塑性, 试样取在铸锭半径的 1/2 处, 实验是在设备为 Gleeble3500 型热/力模拟试验机进行的, 选择了 3 个变形温度(1050, 1100, 1150  )、3 个变形量(15%, 30%,

45%) 和一个变形速率(  $1\text{s}^{-1}$  ), 变形后空冷, 试样尺寸为 8mm 12mm 圆柱。

## 2 结果和讨论

### 2.1 铸锭原始态 相

图1为GH 742合金铸锭 相SEM扫描照片。图

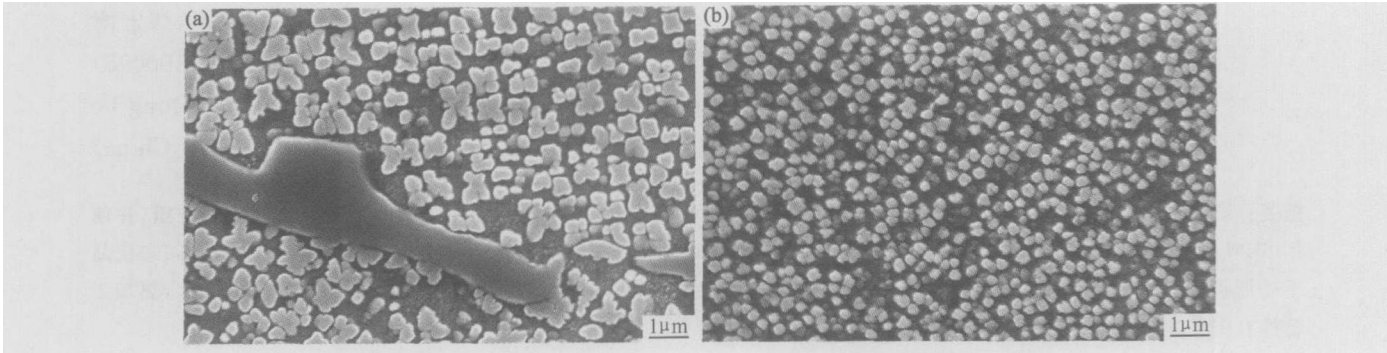


图 1 GH742 合金铸锭未经任何处理时 相 SEM 照片 (a) 枝晶间; (b) 枝晶干

Fig. 1 SEM photos of  $\gamma$ -phase of GH742 alloy ingot without any treatment (a) in the interdendrite; (b) in the dendrite arm

GH 742 铸锭合金存在枝晶偏析, 本实验采用电子探针(EPMA)对合金中的主要元素做了定量分析, 测量数据见表 2。可以看出从枝晶干到枝晶间, Ti, Nb, Al, Mo, Cr 等元素都有不同程度的偏析, 其中 Nb, Mo, Ti 富集于枝晶间, 而 Ni, Cr, Al 在枝晶间贫化, 枝

晶干与枝晶间正好相反, 就偏析程度来看, Nb 的偏析最为严重, 从枝晶干中的 1.26% 到枝晶间的 2.16%, 偏析系数  $K_{Nb}=1.714$ ,  $K_{Mo}=1.268$ ,  $K_{Ti}=1.162$ ,  $K_{Al}=-1.303$  (负号表示枝晶间贫化),  $K_{Cr}=-1.089$ ,  $K_{Co}=1.031$ , Nb 的偏析程度较其它元素大。

表 2 GH742 合金主要元素不同部位的含量 (质量分数/%)

Table 2 The main element composition of GH 742 alloy ingot (mass fraction /%)

Elem ent	Dendrite 1				Dendrite 2			
	Inter-dendrite	Dendrite arm	Transi-tion	Segregation coefficient	Inter-dendrite	Dendrite arm	Transi-tion	Segregation coefficient
Ti	3.73	3.21	3.44	1.162	2.68	2.99	2.95	1.116
Nb	2.16	1.26	1.29	1.714	1.55	1.48	1.73	1.169
Al	3.53	4.60	5.07	- 1.303	4.38	4.80	4.48	- 1.096
Mo	3.83	3.02	3.07	1.268	3.07	3.18	3.16	1.036
Cr	13.90	14.99	14.82	- 1.078	13.67	14.89	13.50	- 1.089
Co	10.03	9.81	9.73	1.031	10.10	9.90	9.84	1.026

### 2.2 均匀化后 相

图 2 为经 1160 16h 均匀化处理后的 相的 SEM 扫描照片, 冷却方式为空冷, 可以看出, 经 1160 16h 均匀化后原铸锭中的 相已溶解, 各元素经长时间扩散后在枝晶中的分布均匀, 在空冷的过程中, 析出的 相来不及长大, 尺寸比没经均匀化前小得多, 大约为 0.07  $\mu\text{m}$ 。

实验对经 1160 16h 后试样的主要元素进行了定量分析。表 3 为 1160 16h 均匀化后枝晶干到枝晶间 Ti, Nb, Cr, Co, Al, Mo 元素电子探针(EPMA)测量结果。就偏析程度来看,  $K_{Nb}=1.046$ ,  $K_{Ti}=1.257$ ,

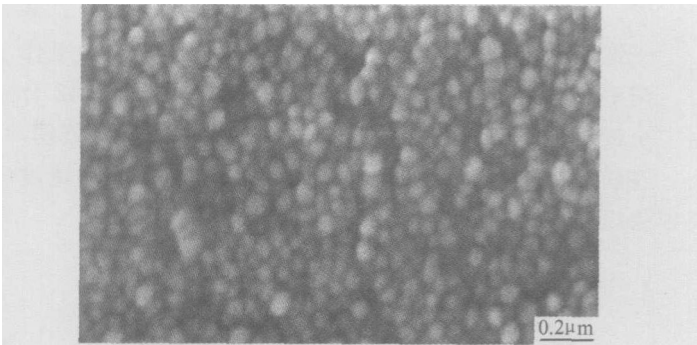


图 2 GH742 合金铸锭 1160 16h 均匀化后的 相 SEM 照片

Fig. 2 SEM photo of  $\gamma$ -phase of GH742 alloy ingot after homogenizing of 1160 16h

$K_{Al} = -1.265$  (负号表示枝晶间贫化),  $K_{Cr} = -1.079$ ,  $K_{Co} = 1.022$ , Nb 的偏析程度较其它元素大。试样经 1160 16h 处理后 Mo, Cr, Co 的偏析系数在 1.0 左右, Ti, Nb, Al 元素偏析消除不很明显, 和铸锭相比各

个元素的分布有所改善。  
**2.3 均匀化后经特殊处理的 相**  
GH742 合金铸锭均匀化后炉冷至 1100 ,再缓慢冷却到 1050 ,其 相的扫描照片见图 3。图 3a 为

表 3 GH742 合金经 1160 16h 后主要元素含量(质量分数/%)

Table 3 The main element composition of GH742 alloy after homogenizing of 1160 16h(mass fraction / %)

Elem ent	Dendrite 1				Dendrite 2			
	Inter-dendrite	Dendrite arm	Transi-tion	Segregation coefficient	Inter-dendrite	Dendrite arm	Transi-tion	Segregation coefficient
Ti	3.248	2.583	2.835	1.257	3.244	2.993	3.091	1.083
Nb	3.942	2.622	3.116	1.503	3.963	3.482	3.665	1.138
Al	2.134	2.186	2.133	-1.025	2.092	2.647	2.142	-1.265
Mo	4.723	4.515	4.563	1.046	4.678	4.594	4.609	1.018
Cr	13.492	14.559	13.929	-1.079	13.531	13.981	13.872	-1.033
Co	10.195	10.524	9.977	1.022	10.258	10.208	10.137	1.007

枝晶间处 相,图 3b 为枝晶干处 相,此时 相已呈花瓣状,由于时间较短,花瓣状 相没有完全长大。花瓣状组织形成是一个复杂的动态 相析出、长大和溶解的结果。其具体过程为:在 1160 均匀化温度时 相几乎全部溶解,在随后冷却到 1100 之前没有相的析出,从 1100 处开始有 相析出,由于此时温度较高,析出的 相很快长大,形成粗大的 相,在从 1100 和 1050 之间的缓冷过程中,温度降低,平衡时 相数量增加,所以会析出新的 相,新析出的相在长大的过程中受到界面能的控制而以细小的球状析出,由于此时的温度较高, 相继续聚集长大,在此过程中由于受到共格应变能的控制而使得 相沿某些特定的方向优先长大,最终使 相呈花瓣状<sup>[2]</sup>。  
图 4 为从 1050 炉冷到室温时 相的扫描电镜照片。图 4a 为枝晶间处 相,图 4b 为枝晶干处相,可见, 相尺寸明显增大,枝晶间 相尺寸已达到 2~4 μm,枝晶干 相尺寸大约为 2 μm, 相在枝晶间和枝晶干呈大小两种混合尺寸的分布,粗大 相呈梅花状,细小 相呈球状。1100 到室温的炉冷过程中,花瓣状的 相继续长大,新析出的 相由于温度的降低来不及长大呈细小球状分布。由图 4 可见,室温时 相在枝晶干和枝晶间的尺寸上仍有差别,枝晶间尺寸较大,这是由于均匀化后,由于原子在固相中的扩散非常缓慢,完全消除元素偏析是不可能的<sup>[3]</sup>,最终导致 相尺寸在枝晶间和枝晶干的差别,和铸锭相比已有很大改善。

**2.4 塑性的改善**

表 4 给出了 GH742 合金原始状态和均匀化后特

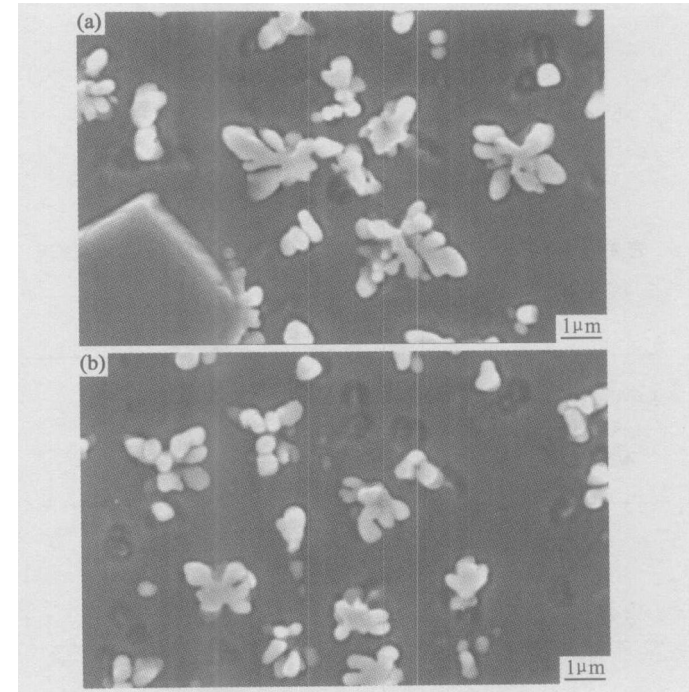


图 3 GH742 合金铸锭 1050 下的 相 SEM 照片  
(a) 枝晶间; (b) 枝晶干  
Fig. 3 SEM photos of -phase of GH742 alloy ingot at 1050  
(a) in the interdendrite ; (b) in the dendrite arm

殊处理两种状态下的压缩实验表面情况。可以看出,原始态在 1050 下 30% 变形量时已有裂纹出现,原始态在 1100~1150 范围内塑性较好,最大变形量不超过 45%;经均匀化特殊处理后,只有在 1050 45% 变形量时有裂纹出现,1100 和 1150 在小于 45% 变形量时表面完好,甚至有更大的允许变形程度。和原始态相比,在 3 个温度下允许变形量都有所提高,同一

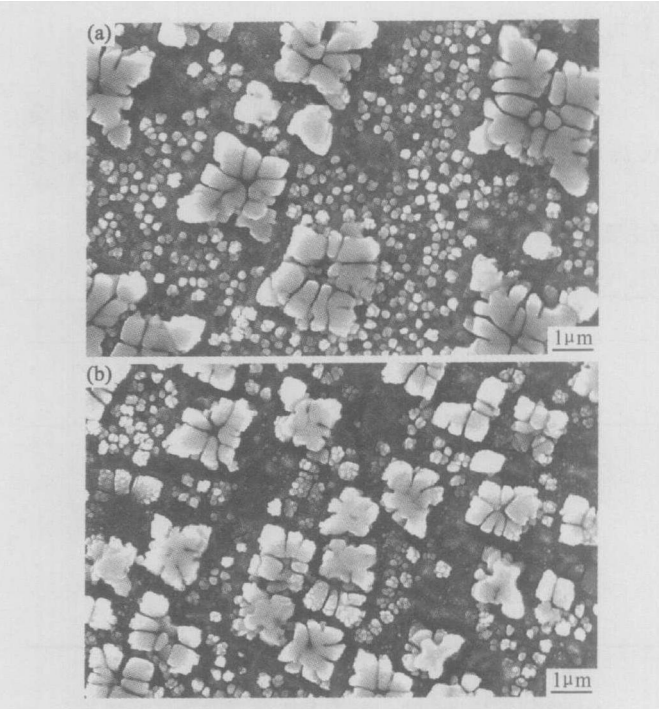


图 4 GH742 合金铸锭均匀化后特殊处理的  $\gamma$  相 SEM 照片  
(a) 枝晶间; (b) 枝晶干  
Fig. 4 SEM photos of  $\gamma$ -phase of GH742 alloy ingot after the post-homogenization special treatment  
(a) in the interdendrite; (b) in the dendrite arm

表 4 原始态和均匀化后特殊处理状态下压缩实验表面情况  
Table 4 The compressed surfaces of the originality and the post-homogenization special treatment

Deformation temperature /	Deformation extent in originality/ %			Deformation extent in post-homogenization special treatment/ %		
	15	30	45	15	30	45
1050	Uncracked	Cracked	Cracked	Uncracked	Uncracked	Cracked
1100	Uncracked	Uncracked	Cracked	Uncracked	Uncracked	Uncracked
1150	Uncracked	Uncracked	Cracked	Uncracked	Uncracked	Uncracked

变形量下的变形温度变宽。

3 结论

- (1) GH742 合金铸锭存在枝晶偏析, 其中 Nb 的偏析最大。
- (2) GH742 合金铸锭在未经处理时  $\gamma$  相较小, 在枝晶干和枝晶间的形状、尺寸大小差别较大; 经均匀化空冷后, 只存在细小的  $\gamma$  相; 经均匀化后特殊处理, 部分  $\gamma$  相明显增大, 呈花瓣状, 整体呈大小两种混合尺寸分布。
- (3) 经均匀化后特殊处理, GH742 合金铸锭在一

定变形量时塑性变形温度变宽, 一定温度下允许变形量变大。

参考文献

[ 1 ] FURR DAVID. Forging aerospace components[ J]. Advanced Materials Processes, 1999, 155( 3): 33- 36.  
[ 2 ] 龙正东, 庄景云, 邓波, 等. 一种提高高强度高温合金热加工性能的新方法[ J]. 金属学报, 1999, 35( 11): 1211- 1213.  
[ 3 ] 崔忠圻. 金属学及热处理[ M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

收稿日期: 2004-12-20; 修订日期: 2005-09-12  
作者简介: 李伟( 1979- ), 女, 硕士研究生, 现主要从事粉末铝合金材料研究, 联系地址: 北京 81 信箱 2 分箱( 100095)。

( 上接第 32 页)

ature Application proceedings of the International Symposium on Niobium for High Temperature Applications[ C]. Warrendale, USA: TMS, 2004. 64- 74.  
[ 9 ] 曲士昱, 王荣明, 韩雅芳. 热处理对 Nb-10Si 合金显微组织的影响[ J]. 航空材料学报, 2001, 21( 3): 9- 12.  
[ 10 ] QU Shi-yu, HAN Ya-fang, SONG Li-guo. Microstructures and properties of refractory niobium-silicide-based composites[ A]. Proceedings of the 5th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing( PRICM-5) [ C]. Uetikon, Zuerich, Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2005. 737- 740.  
[ 11 ] BEWLAY B P, JACKSON M R, SU BRAMANIAN P R, et al. Very high-temperature Nb-Silicide-based composites[ A]. Niobium for High Temperature Application-proceedings of the International Symposium on Niobium for High Temperature Applications[ C]. Warrendale, USA: TMS, 2004. 51- 61.  
[ 12 ] RYOHEI TANAKA, AKIO KASAMA, MASAKUNI FUJII-KURA, et al. Newly developed niobium-based superalloys for elevated temperature application[ A]. Niobium for High Temperature Application-proceedings of the International Symposium on Niobium for High Temperature Applications[ C]. Warrendale, USA: TMS, 2004. 89- 98.  
[ 13 ] MENON E S K. Phase transformations and oxidation resistance of Nb-Ti-Si-based alloys[ A]. Niobium for High Temperature Application-proceedings of the International Symposium on Niobium for High Temperature Applications [ C]. Warrendale, USA: TMS, 2004. 63- 74.

基金项目: 国家 863 基金资助项目( 2003AA305810); 航空科学基金资助项目( 03G21003)  
收稿日期: 2005-07-28; 修订日期: 2005-10-20  
作者简介: 宋立国( 1976- ), 男, 博士生, 研究方向为金属间化合物结构材料, 联系地址: 北京 81 信箱 1 分箱( 100095)。