

GH2907 合金 VIM + VAR 3 t 钢锭 1 190 °C 均质化过程中 Nb 和 Si 的扩散行为

王志刚^{1,2} 文嘉利³ 杨贵新⁴ 郑振宇² 廖凯⁵ 韩光炜¹

(1 钢铁研究总院高温材料研究所,北京 100081;2 高品质特殊钢湖北省重点实验室,黄石 435001;3 贵州航宇科技发展股份有限公司,贵阳 550081;4 湖北工程职业学院,黄石 435000;5 黄石市产品质量监督检验所,黄石 435000)

摘要 利用光学显微镜、扫描电镜等研究了 GH2907(0.02C,38.20Ni,13.92Co,4.92Nb,1.60Ti,0.32Si)合金 $\Phi 508$ mm 3 t 钢锭 Nb 和 Si 在 1 190 °C 的扩散规律。研究表明,GH2907 合金 $\Phi 508$ mm 钢锭的枝晶间距大约 110 μm , Nb 和 Si 在 1 190 °C 的表观扩散系数分别为 $D = (0.704 \pm 0.041) \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$, 和 $D = (1.870 \pm 0.511) \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 。理论计算表明,1 190 °C Nb 扩散 44.8 ~ 50.3 h, Si 扩散 14.0 ~ 24.5 h 可使其残余偏析指数 δ_i 达到 0.02。

关键词 GH2907 合金 1 190 °C 扩散 表观扩散系数 偏析

Diffusion Behavior of Nb and Si in GH2907 Alloy VIM + VAR 3 t Ingot During Homogenization Process at 1 190 °C

Wang Zhigang^{1,2}, Wen Jiali³, Yang Guixin⁴, Zheng Zhenyu², Liao Kai⁵ and Han Guangwei¹

(1 Central Iron and Steel Research Institute, High Temperature Material Research Institute, Beijing, 100081;
2 Hubei Key Laboratory of High Quality Special Steel, Huangshi, 435001; 3 Guizhou Hangyu Technology
Development Co Ltd, Guiyang, 550081; 4 Hubei Engineering Vocational College, Huangshi,
435000; 5 Huangshi Product Quality Supervision and Inspection Institute, Huangshi 435000)

Abstract Nb and Si diffusing rule at 1 190 °C in GH2907 (0.02C,38.20Ni,13.92Co,4.92Nb,1.60Ti,0.32Si) alloy $\Phi 508$ mm 3 t ingot is studied by using optical microscope, scanning electron microscope etc. Studies have shown that the dendrite spacing of the GH2907 alloy $\Phi 508$ mm ingot is approximately 110 μm , the apparent diffusion coefficients of Nb and Si at 1 190 °C are respectively $D = (0.704 \pm 0.041) \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ and $D = (1.870 \pm 0.511) \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$. Theoretical calculation shows that, when Nb diffuses 44.8 ~ 50.3 h or Si diffuses 14.0 ~ 24.5 h at 1 190 °C, the residual segregation index δ_i will reach 0.02 respectively.

Material Index GH2907 Alloy, diffusion at 1 190 °C, Apparent Diffusion Coefficients, Segregation

GH2907 合金热膨胀系数大约只有 In718 合金的二分之一,同时该合金在 650 °C 以下具有良好的冷热疲劳性能、较为恒定的弹性模量以及良好的综合力学性能,广泛应用于制造航空发动机封严环、机匣、涡轮外环等间隙控制部件,是航空工业发展不可或缺的关键材料^[1]。GH2907 合金中通过添加 4.90% 的 Nb 和少量的 Si 元素以获得良好的综合力学性能,但是在钢锭凝固过程中会产生严重的枝晶偏析和各种低熔点脆性相,不仅会影响钢锭的热加工塑性,同时会引起最终产品的条带偏析和力学性能不稳定,因此必须在热加工前对钢锭进行均匀化热处理,以消除枝晶偏析和低熔点相^[2-3]。前期有文献系统研究了 GH2907 合金在 1 160 °C 条件均匀化行为,可以达到消除低熔点相和促进 Nb 均匀化的目的^[4],但是这个温度用于均匀化有些偏低,因此提升均匀化温度加快扩散过程更有利于降低生产成本。

1 试验材料和方法

(VIM + VAR) 双真空工艺生产的 GH2907 合金 $\Phi 508$ mm 钢锭重为 3 t,化学成分如表 1。在钢锭的充填端横截面中心的位置切取 30 mm \times 30 mm \times 30 mm 的试样若干,进行均匀化热处理工艺研究。首先将铸态试样进行预处理,预处理温度为 1 160 °C 10 h, AC + 800 °C 2 h, AC(空冷)。本文定义预处理后的试样状态为初始状态,以预处理后的试样作为研究对象,进行 Nb、Ti 元素的扩散行为研究。

首先试样分成 4 组,分别在 1 190 °C 保温 2、5、8、10 h 后水冷,随后将 4 组试样在 800 °C 保温 4 h 后空冷,利用 Origin Pro2018 最小二乘法拟合并计算材料的表观扩散系数。金相试样采用 1.5 g 硫酸铜 + 20 ml 盐酸 + 20 ml 酒精的混合溶液进行腐蚀,腐蚀时间 60 ~ 90 s。

表 1 GH2907 合金的化学成分/%

Table 1 Chemical components of GH2907 alloy/%

C	Si	Ni	Co	Ti	Nb	Mn
0.020	0.32	38.20	13.92	1.60	4.92	0.36

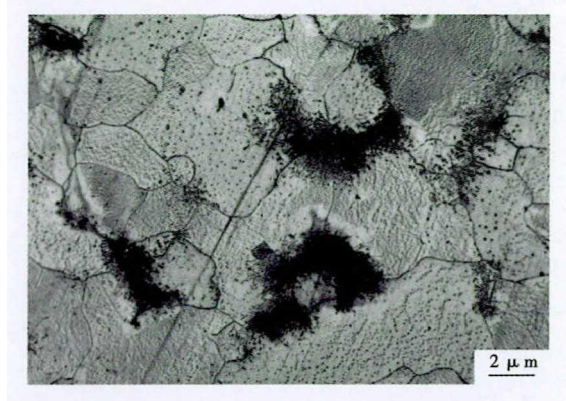


图 1 GH2907 合金初始状态试样的铸态组织

Fig. 1 Microstructure of casting in initial state sample of GH2907 alloy

2 试验结果与讨论

2.1 试样初始状态分析

本试验以经过“1 160 °C 10 h, AC + 800 °C 2 h, AC”预处理的铸态试样为研究对象。其中 1 160 °C 处理是为了使低熔点 Laves 相完全回溶, 800 °C 处理是为使富 Nb 的枝晶间区域析出大量的 ε 针状相, 有助于区分铸态组织的枝晶间和枝晶干(图 1), 在研究过程中忽略了 800 °C 处理过程对元素扩散的影响。枝晶间距通过测量 12 个视场, 取平均值获得, 测试结果为 110 μm。微区成分扫描均在同一条件

表 2 GH2907 合金初始状态试样的微区成分结果/%

Table 2 Results of microregion analysis of GH2907 alloy initial state sample/%

扫描区域	Si	Ti	Mn	Fe	Co	Ni	Nb
富 Nb	0.53	2.12	0.45	34.81	13.74	36.79	11.58
贫 Nb	0.28	1.94	0.46	40.60	14.96	38.39	3.37

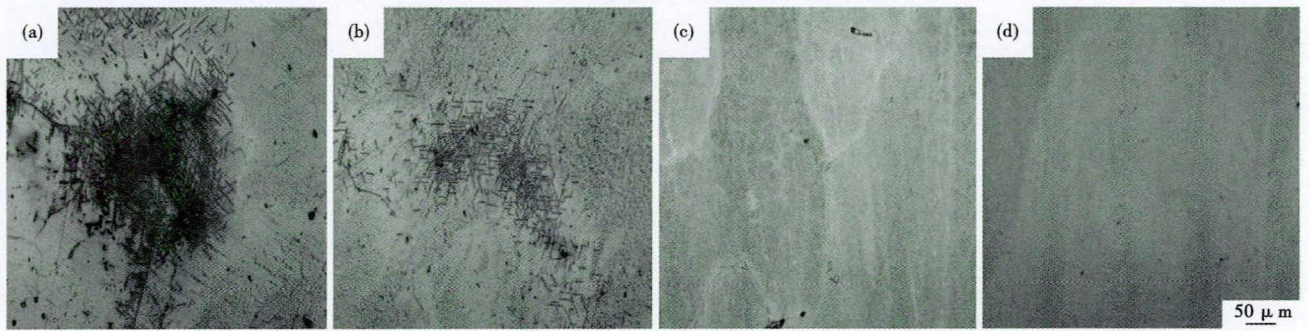


图 2 GH2907 合金 1 190 °C :2 h(a)、5 h(b)、8 h(c) 和 10 h(d) 均匀化后试样高倍组织

Fig. 2 Microstructure of GH2907 alloy homogenized at 1 190 °C for 2 h(a)、5 h(b)、8 h(c) and 10 h(d)

表 3 1 190 °C 加热微区成分分析结果/%

Table 3 Component analysis results of localized area heating at 1 190 °C/%

时间/h	扫描区域	Si	Ti	Mn	Fe	Co	Ni	Nb
2	富 Nb	0.48	1.83	0.54	38.10	13.96	38.63	6.46
	贫 Nb	0.28	1.67	0.51	41.48	14.65	36.79	4.62
5	富 Nb	0.45	1.81	0.53	38.66	14.28	38.07	6.17
	贫 Nb	0.31	1.63	0.52	41.33	14.69	36.73	4.79
8	富 Nb	0.43	1.93	0.45	37.85	14.48	38.80	6.03
	贫 Nb	0.34	1.81	0.50	40.95	14.17	37.46	4.89
10	富 Nb	0.34	1.78	0.42	39.23	14.49	37.80	5.94
	贫 Nb	0.37	1.66	0.33	41.74	14.45	36.44	5.01

下测量 3 个视场, 取平均值, 试样初始状态的微区成分如表 2 所示。枝晶间富 Nb、Ti、Si 而贫 Fe、Co、Ni, 枝晶干富 Fe、Co、Ni 而贫 Nb、Ti、Si。从成分偏差看, Ti 偏析最轻、Si 次之、Nb 最严重。

2.2 时间处理对试样组织及成分偏析的影响

初始状态试样在 1 190 °C 条件下分别加热 2、5、8、10 h 后的组织如图 2 所示, 在 1 190 °C 处理 5 h 后尚能看到 Nb 元素偏析引起的 ε 相聚集形成, 但是当 1 190 °C 处理 8 h 后, 在光学显微镜条件下, 基本看不到 ε 相偏聚。对四组试样的高 Nb 区域和低 Nb 区域进行微区成分分析, 并取平均值, 结果如表 3 所示。对比金相图片和微区成分(表 3)可以看出, 虽然在 1 190 °C 处理 8 h 以后, 金相条件下基本看不到偏析倾向, 但实际上仍然有较严重的成分偏析存在。

2.3 Nb、Si 1 190 °C 的表观扩散系数计算

引用 Flemings^[5-6] 在处理均匀化的问题时引入的残余偏析指数 δ_i 的概念。

$$\delta_i = \frac{C_M - C_m}{C_M^0 - C_m^0} \quad (1)$$

以及表观扩散系数和残余偏析指数的关系。

表4 Nb、Si的 C_M^0 和 C_m^0 取值/%Table 4 C_M^0 and C_m^0 value for Nb and Si/%

项目	Nb	Si
C_M^0	11.58	0.53
C_m^0	3.37	0.28

表5 四组试样不同元素的残余偏析系数 δ_i Table 5 The residual segregation index δ_i of different elements in four groups of samples

元素	均匀化时间/h			
	2	5	8	10
Nb	0.224 1	0.168 1	0.138 9	0.113 3
Si	0.800 0	0.560 0	0.360 0	0.120 0

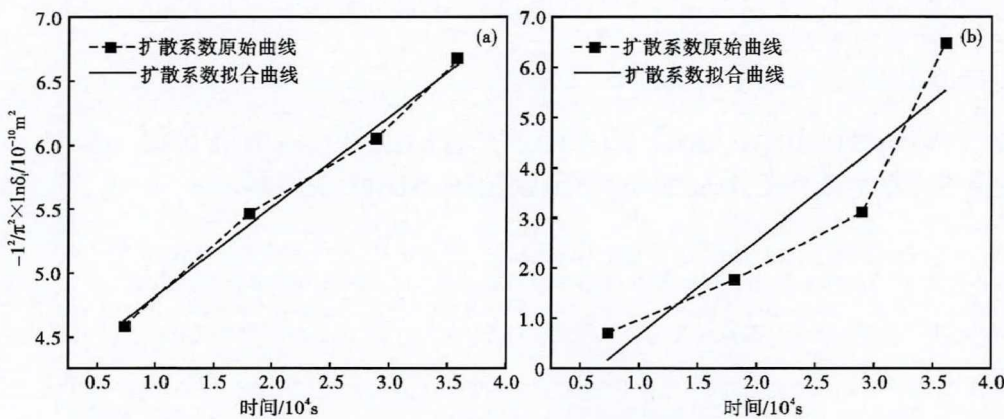


图3 1190℃ Nb(a)和Si(b)扩散系数的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of diffusion coefficients of Nb (a) and Si (b) at 1190 °C

$$\delta_i = \exp \frac{-\pi^2 Dt}{I^2} \quad (2)$$

其中 C_M^0 和 C_m^0 分别代表初始态试样中相应元素富集区域的最高值和贫化区域的最低值,即按照表2的分析结果,本文计算Nb、Si元素的偏析情况,相应的 C_M^0 和 C_m^0 值如表4所示。 C_M 和 C_m 分别对应不同代号试样相应元素的最高值和最低值(参照表3)。代入式(1) $\delta_i = \frac{C_M - C_m}{C_M^0 - C_m^0}$ 中,计算出四组试样不同元素的残余偏析系数(表5)。

将式(1)和式(2)合并,得出:

$$D \times t = -\frac{I^2}{\pi^2} \ln \delta_i \quad (3)$$

上式(3)中:t-对应的扩散时间,I-扩散距离,即1/2枝晶间距,取值为55 μm, δ_i -对应的残余偏析系数。

拟计算得出在1190℃Nb的表观扩散系数约为 $D = (0.704 \pm 0.041) \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$,Si的表观扩散系数约为 $D = (1.870 \pm 0.511) \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ (图3)。原子固态扩散主要依靠空位机制来完成原子的迁移

和扩散,因此,扩散效果不仅要受到空位浓度的影响,还与原子本身的尺寸有关。据有关文献记载,Nb原子的共价半径是1.34Å, Si原子的共价半径是1.17Å^[7],是Si表观扩散系数要高于Nb的主要原因。

以残余偏析指数达到0.02为扩散终止条件,将Nb和Si的相应数据代入公式 $\delta_i = \exp \frac{-\pi^2 Dt}{I^2}$ 中,可以得出,以GH2907合金初始状态试样为研究对象,1190℃Nb扩散44.8~50.3h以上、Si扩散14.0~24.5h以上可以达到比较理想的效果。

3 结论

(1)双真空工艺生产的GH2907合金Φ508mm锭的中心部位的平均枝晶间距大约110 μm。

(2)钢锭中Ti的偏析最轻、Si次之、Nb最严重,在1190℃Nb的表观扩散系数 $D = (0.704 \pm 0.041) \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$,Si表观扩散系数 $D = (1.870 \pm 0.511) \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

(3)在1190℃扩散,以残余偏析指数达到0.02为扩散终止条件,Nb元素需要扩散44.8~50.3h, Si元素需要扩散14.0~24.5h。

参考文献

- [1]张绍维,付书红,邓波.中国高温合金手册[M].(上卷),北京:中国标准出版社,2012:481.
- [2]Heck K A, Smith D F, Smith J S, Wells D A, Holderdy M. The Metallurgical Society of AIME[J]. JOM, 1983, 35(12): 214-215.
- [3]Heck K A, Wanner E A, Antonio D A. Physical Metallurgy of Controlled Expansion Invar Type Alloys[J]. The Minerals Metals Materials Society, 1990, 2(3): 273-274.
- [4]王志刚. GH907合金铸锭均匀化热处理[J]. 中国冶金, 2018, 28(9): 33-36+53.
- [5]Flemings M C. Solidification Processing[R]. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [6]威正风. 固态金属中的扩散与相变[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- [7]顾庆超. 化学用表[M]. 南京:江苏科技出版社, 1979:14-15.

王志刚(1982-), 博士生, 教授级高级工程师, 2005年东北大学(本科)毕业, 高温合金产品及生产工艺研发。
E-mail: wangzhigang025011@citicsteel.com

收稿日期:2020-11-26