



Nb 对 GH4169 合金管材组织性能的影响

王哨兵^{1,2}, 孙文强^{1,2}, 王曼^{1,2}, 周珠^{1,2}, 刘正东^{1,3}, 钟强^{1,2}

(1 浙江久立特材科技股份有限公司, 湖州 313028; 2 浙江久立金属材料研究院有限公司, 湖州 313028;

3 中国钢研科技集团有限公司, 北京 100000)

摘要:采用真空感应、电渣重熔、真空自耗、均匀化热处理、锻造、热挤压、冷轧、热处理等工艺得到 Nb 含量分别为 4.90% 和 5.30% 的两种 GH4169 合金管, 在其他成分基本保持一致的情况下, 研究了 Nb 含量对 GH4169 合金管材组织性能的影响。结果表明, 在相同的热处理工艺下, 随着 Nb 含量的增加, Nb 含量越高, 晶粒尺寸越细小; 200 °C 和室温抗拉强度、屈服强度都随着 Nb 含量的增加而增加; 且在 GH4169 合金管材中的析出相含量也增加。GH4169 合金管在不同的固溶热处理和相同的时效热处理工艺下, 得到 GH4169 合金管材的晶粒度尺寸在 4.0~7.0 级, 晶粒尺寸越小, 管材的抗拉强度和屈服强度越高; 在相同的晶粒度下, Nb 含量越高, 管材的抗拉强度、屈服强度都随着 Nb 含量的增加而增加。

关键词:GH4169 合金管; Nb 含量; 晶粒度; 室温拉伸; 200 °C 高温拉伸; 析出相

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00224 **中图分类号:**TG230.2

The Effect of Nb on Microstructure and Properties of GH4169 Alloy Pipe

Wang Shaobing^{1,2}, SunWenqiang^{1,2}, Wang Man^{1,2}, Zhou Zhu^{1,2}, Liu Zhengdong^{1,3}, Zhong Qiang^{1,2}

(1 Zhejiang Jiuli Hi-Tech Metals Co., Ltd., Huzhou 313028, China; 2 Zhejiang Jiuli Metal Materials Research Institute Co., Ltd., Huzhou 313028, China; 3 China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100000, China)

Abstract: With the manufacturing process by vacuum induction, electroslag remelting, vacuum self consumption, homogenization heat treatment, forging, hot extrusion, cold rolling, and heat treatment. we can get two types of GH4169 alloy pipes with Nb content of 4.90% and 5.30% respectively. The effect of Nb content on the microstructure and properties of GH4169 alloy pipes was studied while other components remained basically the same. The results show that under the same heat treatment process, with the increase of Nb element content, the Nb content becomes higher and the grain size becomes smaller; At 200 °C and room temperature with the tensile strength and yield strength both increase with the increasing of Nb content, And the content of precipitates in GH4169 alloy pipes also increases. Under different solid solution heat treatments and the same aging heat treatment process, the grain size of GH4169 alloy pipes is in the range of 4.0-7.0. The smaller the grain size, the higher the tensile strength and yield strength of the pipes; At the same grain size, the higher the Nb content, the higher the tensile strength and yield strength of the pipe.

Key Words: GH4169 Alloy Pipe; Nb Content; Grain Size; Tensile at Room Temperature; High Temperature Tensile at 200 °C; Precipitated Phase

GH4169 合金是一种由 Fe-Cr-Ni 为主要元素组成的变形高温合金, 在 GB/T14492—2005 中的钢种牌号为 GH4169, 在 ASTM B637—2018 中的钢种牌号为 Inconel 718。其材料的基体组织由奥氏体、 δ 相、碳化物和作为强化相的 γ'' 和 γ' 组成。GH4169 合金经过了多年的各类相的形成机理研究、产品的稳定化制造, 其应用范围从航空发动机的结构件、石油化工业中的井下工具, 到核电反应堆结构部件中压力结构元件, 材料的应用范围越来越广, 其产品的应用需求量也越来越大。师昌绪、KurtP. Rohrbach^[1-3] 等对高温合金的组织、性能进行了大

量的研究, 并从应用领域进行了详细的介绍, 其研究内容从高温合金的发展史到高温合金的技术开发, 各类高温合金的成分组成、特性、冶炼方式、锻造工艺、应用场景和组织性能等, 特别论述了 Inconel 718 合金的研究概况, 不断的开发新工艺和新技术, 使 Inconel 718 合金的应用量达到了变形高温合金的 40% 以上; 徐强^[4] 等对先进高温合金材料的开发进行了对比研究, 包括高温合金、陶瓷、难熔金属、复合材料等都进行了论述, 论证变形高温合金的应用场景和不可替代性; 丁天胜^[5] 等研究了两种不同热处理工艺对 GH4169 合金组织性能的影响,

分析了GH4169合金在不同热处理工艺下组织变化情况,并在不同的应变条件下 δ 相对合金低周疲劳性能的影响,发现随着900℃保温时间的延长,GH4169合金 δ 相的析出量增加,而合金在高应变幅下的疲劳寿命基本不受 δ 相含量变化的影响;孔永华、魏先平^[6-7]等主要探究了不同热处理工艺对GH4169合金管材影响,研究了在不同热处理工艺下合金的晶粒度、析出相的差异性及其对组织性能的影响,进而指导GH4169合金材料的性能控制;白亚冠^[8]等探究了GH4169合金中 δ 相的析出、溶解规律,阐述了这类相的形成和析出规律;韦家虎^[9]等在上述研究的基础上分析了强化相对GH4169的热变形行为影响,其考虑到GH4169合金中各类强化相的差异;张海燕^[10]等对GH4169合金中强化相与晶粒度关系进行进一步的研究。在不断了解、深化对GH4169合金材料认识的同时,不断开发出新工艺、新技术,使该材料的应用领域不断扩大。

调研的大量的科研工作者的论文文献、技术资料等,主要集中在GH4169合金的应用选择、热加工制造、热处理、晶粒组织和强化相研究,并没有对GH4169合金中Nb含量对材料组织性能的影响进行深入的探究,随着GH4169合金的应用范围越来越广泛,采用相同的制造工艺加工的管材并不符合所有的应用场景。本文主要探究Nb元素对GH4169合金管材组织性能影响,进而指导GH4169合金管材在不同应用场景下的Nb元素选择,更好的为管材产品服务。

1 试验材料及方法

GH4169合金材料具有较高的合金含量,鉴于其材料在不同领域的应用差异性,如油气领域和航空领域中对Nb含量要求差异比较大,但是其组织性能、应用差异并没有一个详细的论述。本文依据GB/T14492—2005和ASTM B637—2018的标准要求,在其他组元成分,以及冶炼、锻造、热挤压、制管、热处理工艺基本保持一致的情况下,研究低Nb [$w(\text{Nb})4.90\%$]和高Nb [$w(\text{Nb})5.30\%$]对成品管材的组织性能的影响。

GH4169合金采用真空感应(VIM)+电渣保护重熔(ESR)+真空自耗(VAR)的三联工艺进行冶炼,得到2种不同成分的GH4169合金钢锭,对钢锭进行高温均匀化退火,均匀化退火工艺为1200℃、保温48h。经过均匀化退火的钢锭进行多道次、小

变形量的热锻工序,锻造成 $\phi 204$ mm的圆管坯。考虑到GH4169合金是一种以Cr-Fe-Ni为基体的时效硬化型镍基高温合金,GH4169合金组织和性能对热加工温度敏感,为了能够保证管坯的热成型,采用先进的热挤压工艺进行热加工,可以有效保证在三向压应力下管材组织均匀,挤压制造的管材规格为 $\phi 100$ mm $\times 15$ mm,挤压过程是一个动态的过程,对挤压管采用大变形冷加工,整体的变形量保证在50%以上,保证大变形量冷轧加工后的 $\phi 76$ mm $\times 10$ mm成品管两端组织均匀,冷加工完成后的管材进行固溶热处理+时效热处理,固溶时效热处理制度为1020℃ $\times 0.5$ h,WC(水冷)+735℃ $\times 5$ h,AC(空冷)。

为了研究采用相同工艺制造下两种Nb含量的管材,对比分析其组织和性能的差异。管材的组织分析方面,采用ASTM E112标准要求对试样进行晶粒度检验,其取样位置为横向,为了保证试样组织显示清晰,试样经过不同目数的砂纸抛光后,试样采用高锰酸钾+10%的稀硫酸溶液按照1:50的比例进行配比、煮沸10 min后,对试样进行草酸电解、无水酒精擦拭,即可得到晶界清晰的晶粒度图片,并在蔡司显微镜下放大100 \times 观察。合金中的析出相试样检测位置与晶粒度有差异,其取样位置为纵向,试样进行抛光后,采用10%的盐酸酒精溶液进行腐蚀,通过该方法腐蚀的试样可保证各类析出相仍然存在于材料基体中,不会出现析出相脱落的现象,制备完成的试样采用蔡司扫描电镜SEM进行分析,试样放大倍数为2000 \times 。管材的性能分析方面,两种Nb含量的管材经过固溶+时效热处理后,纵向取样进行拉伸性能检测,室温拉伸检测标准为ASTM E8—22;200℃高温拉伸检测标准为ASTM E21—20,考虑到GH4169合金管材的尺寸规格为 $\phi 76$ mm $\times 10$ mm,室温拉伸和高温拉伸试样都加工成 $\phi 6$ mm $\times M10$ 的圆棒试样。采用万能试验机进行室温拉伸试验,采用的高温拉伸试验机由拉伸试验用主机、用于温度检测的测量系统、测量屈服强度的引伸计三大部分组成。高温炉内有3根的测温热电偶,热电偶用于接触试样,以反馈试样温度,通过控制器控制加热,使得最终试验温度误差保持在设置温度 ± 10 ℃。

按照上述的工艺方法,最终得到2种不同Nb含量的GH4169合金管材,具体成分见表1。

表 1 2 种不同 Nb 含量的 GH4169 合金管材化学成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of GH4169 alloy pipe with two different Nb contents

项目	C	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	Fe
标准	≤0.08	50.0 ~ 55.0	17.0 ~ 21.0	2.80 ~ 3.30	0.65 ~ 1.15	4.75 ~ 5.50	余量
炉号 1#	0.035	53.63	18.04	2.97	0.99	4.90	余量
炉号 2#	0.033	53.68	17.99	3.03	1.04	5.30	余量

2 试验结果与讨论

2.1 性质图差异

采用 Thermo-Calc 热力学计算软件, 计算 GH4169 合金管材在不同成分下的各相差异。Thermo-Calc 热力学计算软件主要的计算成分为: C、Si、Mn、P、S、Cr、Ni、Mo、Cu、Fe、N、W、V、Nb、Ti、Co、Al 等。在标准范围内, 应用高温合金的数据库, 对各类成分进行微小的调整, 如: C 的变化对碳化物的影响; Cr、Mo 的变化对 σ 相的影响; Nb 对 γ'' 相 (Ni_3Nb)、 γ' 相 ($Ni_3(Al, Ti)$) 及 δ 相 (Ni_3Nb) 的影响等。根据各类元素的变化规律, 可以计算出在平衡状态下材料中的析出情况。

GH4169 合金是一种时效硬化镍基高温合金, 合金中的主要析出相是 γ'' 相 (Ni_3Nb)、 γ' 相 ($Ni_3(Al, Ti)$) 及 δ 相 (Ni_3Nb)。通过热力学计算软件 Thermo-Calc 对 2 种 Nb 含量的 GH4169 合金进行性质图分析^[11], 如图 1 所示, 计算在平衡状态不同 Nb 含量凝固过程中的各类相开始析出温度, 考虑到合金元素在凝固过程中是一个非稳态的动态平衡, 特别是 Nb 元素容易和 Al、Ti 等易偏析元素的结合, 形成复杂的析出相, 析出相的初始析出温度难以准确计算, 利用热力学计算软件只是初步了解各类相的析出情况, 仅为 2 种 Nb 含量下组织性能的差异性提供数据支撑。2 种不同 Nb 含量的 GH4169 合金析出相温度见表 2。

依据图 1 和表 2 的分析结果, 得到两种 Nb 含量合金在平衡状态下各类析出相初始析出温度。虽然 Nb 含量不同, 但是其平衡状态下的性质图析出规律一致, 只是部分相的初始析出温度有一定的差异。GH4169 合金开始从液相向固相凝固时, 优先形成奥氏体基体, 随着凝固过程的进行, 奥氏体中最先析出的是 Ni_3Nb 相, 随着温度的降低, 会依次析出 σ 相、 $Ni_3(Al, Ti)$ 到最后的 $M_{23}C_6$ 相。 Ni_3Nb 相的析出温度随着 Nb 增加而增加, 而 $Ni_3(Al, Ti)$ 的析出温度随着 Nb 含量的增加而减少。造成这种现象的原因, 主要是在 GH4169 合金凝固过程中, Nb 元素优先与 Ni 元素进行结合, 形成 γ'' (Ni_3Nb) 强化相, Ni 原子

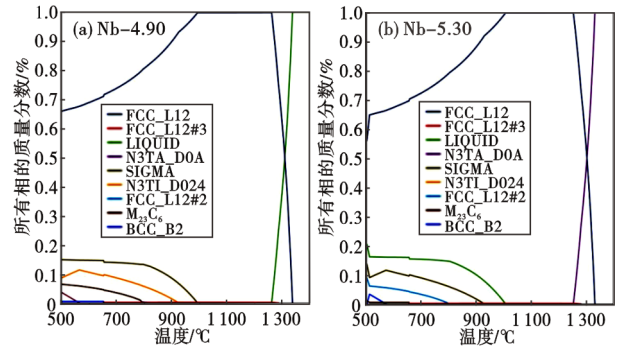


图 1 不同 Nb 含量的 GH4169 合金管材性质图: (a) 4.90%Nb, (b) 5.30%Nb

Fig. 1 Properties of GH4169 alloy with different Nb content: (a) 4.90%Nb, (b) 5.30%Nb

表 2 2 种不同 Nb 含量的 GH4169 合金析出相温度

Table 2 Precipitated phase temperature of GH4169 alloy with two different Nb contents

Nb/%	固相线/°C	σ /°C	Ni_3Nb /°C	$Ni_3(Al, Ti)$ /°C	$M_{23}C_6$ /°C
4.90	1 261	925	993	822	653
5.30	1 255	930	1 000	805	656

的迁移容易造成 Al、Ti 原子附近出现了空位, Ni 原子与 Al、Ti 间的结合力减小, 降低了 γ' ($Ni_3(Al, Ti)$) 强化相的析出温度和含量

2.2 相同热处理工艺下组织性能研究

对 2 种不同 Nb 含量 GH4169 合金成品管材进行取样分析, 包括晶粒度、拉伸性能、200 °C 高温拉伸性能、析出相的含量等。

2.2.1 晶粒度

不同 Nb 含量的 GH4169 合金管在相同的固溶时效热处理工艺下, 晶粒度有着明显的差异, 如图 2 所示。

图 2(a) 显示的晶粒度为 7.0 级, 图 2(b) 显示的晶粒度为 9.0 级, 管材的晶粒度相差 2.0 级。按照扩散理论, 基体中的 Nb 浓度偏高易向贫 Nb 区域或与 Nb 元素具有很强亲和力的元素附近聚集, 容易造成含 Nb 的 δ 相 (Ni_3Nb) 富集, 在奥氏体晶界或晶内析出大量的 δ 相。Nb 元素是合金中的易偏析元素, 在和 Ni 结合形成 Ni_3Nb 强化相时, 其形核的驱动力增大, 造成附近的奥氏体晶粒长大的驱动力增大, 表

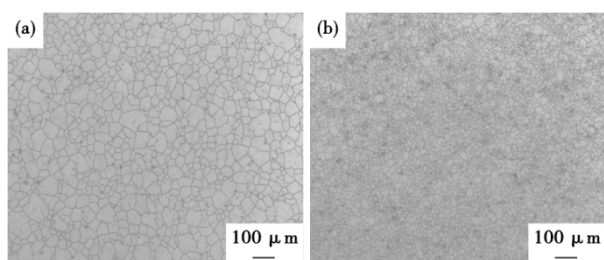


图2 不同Nb含量的GH4169合金管在相同热处理工艺下的晶粒度:(a)4.90%Nb,(b)5.30%Nb

Fig. 2 Grain size of GH4169 alloy pipe with different Nb contents at the same heat treatment process : (a) 4.90%Nb, (b) 5.30%Nb

现为 δ 相(Ni_3Nb)在晶界上起到了“钉扎”作用,阻碍晶粒的长大,造成了采用相同的工艺制度下,得到的晶粒度不同,Nb含量越高,晶粒越细小。蔡大勇等已经对Nb含量与加工工艺、组织性能差异方面进行了研究^[12]。

2.2.2 析出相含量

对两种不同Nb含量的GH4169合金管材进行扫描电镜(SEM)分析,如图3所示。图3中两种Nb含量的管材在SEM下都发现了析出。图3(a)为4.90%Nb的管材,晶界上存在大量白色片状析出相,析出相呈现为不连续分布,晶内未发现别的析出相;图3(b)为5.30%Nb的管材,与图3(a)不同的是白色片状的析出相分布在奥氏体晶界和晶内,奥氏体晶界上的析出相呈不连续分布,晶内析出相呈现为弥散分布的短棒状。

为了进一步确认GH4169合金管材的析出相类别,通过SEM确定析出相的形貌,再采用电子探针标定析出相的元素含量、种类等,通过能谱分析GH4169合金析出相,其能谱检测结果如图4所示。该析出相的Nb质量分数达到了10%。大量的文献

已证明GH4169合金中的 γ' 相化学式为 $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$,其形貌常为方形或球形, γ' 相不仅会在晶内弥散析出,也会呈链状、方形在晶界上析出,而能谱分析结果显示其Nb含量产生偏聚,故判断此相不是 γ' 相。 γ'' 也是GH4169合金中主要的强化相,其化学式为 Ni_3Nb ,形状为片状,因其为亚稳相,在650℃以上长时服役会转变为稳态的 δ 相,其化学式也为 Ni_3Nb ,本实验采用的时效工艺为时效温度735℃,时效时间5h,同时,热力学计算确定的 Ni_3Nb 在该温度区间内,长时间作用下,元素的迁移引起该相析出。故推测此相为 γ'' 和 δ 相的复合相。

上述两种不同Nb含量管材的晶粒度和析出相的分析结果表明,GH4169合金管中,在其他成分基本保持不变的情况下,Nb含量的增加促进了GH4169合金管中的 Ni_3Nb 析出,在晶界上的析出相起到了“钉扎”作用,阻碍了晶粒的长大,验证了在相同制造工艺下,Nb含量偏高,会促成细晶的形成。

2.2.3 拉伸性能

2种Nb含量的管材室温拉伸和高温拉伸性能结果见表3。2种Nb含量下GH419合金管的室温拉伸和200℃高温拉伸的抗拉强度和屈服强度差异较大,室温下,5.30%Nb管比4.90%Nb管的抗拉强度高86MPa,屈服强度高80MPa;200℃下,5.30%Nb管比4.90%Nb管的抗拉强度高96MPa,屈服强度高96MPa。Nb含量的增加促进了强化相 Ni_3Nb 的析出,随着Nb含量的增加,强化相 Ni_3Nb 数量增加,提高了材料的抗拉强度和屈服强度。Nb含量相同时,室温和200℃的伸长率基本保持一致的,说明200℃的高温并不能引起GH4169合金中的强化相变化,强化相与室温保持一致,故其伸长率基本无变化。

Nb原子半径为0.294nm,比常用合金元素中任何一个都大,所以,它具有最大的强化作用,Nb元素

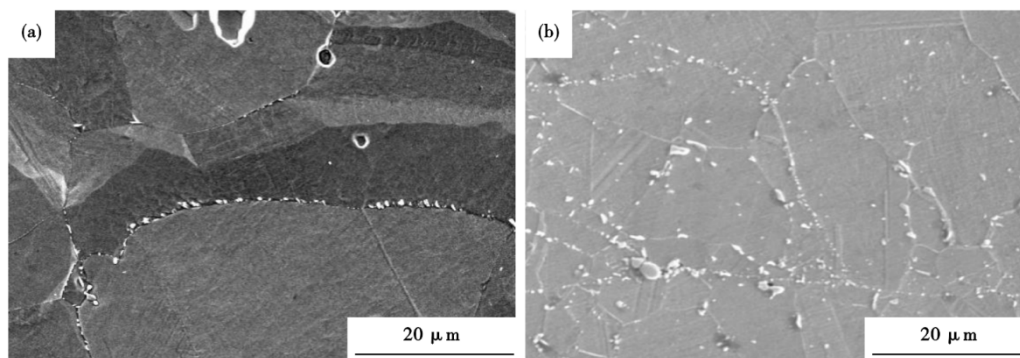
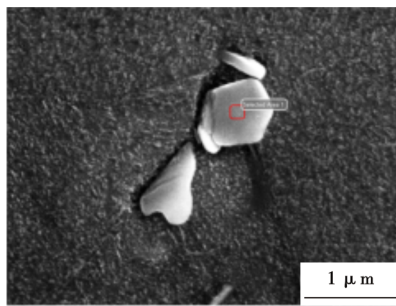


图3 不同Nb含量的GH4169合金管材SEM照片:(a)4.90%Nb,(b)5.30%Nb

Fig. 3 SEM photos of GH4169 alloy pipes with different Nb contents(a)4.90%Nb,(b)5.30%Nb



元素	质量分数/%	原子分数/%
Al	0.40	0.90
Ti	1.80	2.20
Cr	15.90	18.10
Mn	0.50	0.50
Fe	15.10	16.00
Ni	53.80	54.40
Nb	10.00	6.40
Mo	2.50	1.50

图4 5.30%Nb管材电解侵蚀后析出相扫描电镜图

Fig. 4 SEM of precipitated phase after electrolytic erosion of 5.30%Nb tube

表3 2种Nb含量的GH4169合金管室温拉伸和200℃高温拉伸性能

Table 3 At room temperature and 200℃ high temperature tensile sproperties of GH4169 alloy tubes with two Nb contents

Nb/%	室温			200℃		
	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%
4.90	1 300	1 050	32	1 214	952	31
5.30	1 386	1 130	24	1 310	1 048	26

易与C、N、Ni、Ti、Al等元素形成不同的溶度积,特别是在Nb含量较高时,元素间的相互作用系数为正,提高了Nb的活度,降低了Nb的溶解度,再结合Nb元素较高时在晶界形成强化相的“钉扎”作用,造成的晶粒尺寸偏小,提高材料的抗拉强度和屈服强度。在高温下,随着温度的上升,Nb元素在材料中的溶解度提高,造成其强度下降。

2.3 不同晶粒度下管材组织性能

针对上述不同Nb含量,采用相同的冷变形工艺和热处理制度,得到最终产品的晶粒尺寸差异大,材料的拉伸性能也随之变化,为此,在保持冷变形量不变的情况下,调整热处理工艺制度,并且只调整固溶热处理工艺制度,不改变时效热处理工艺制度^[13-14]。

为了研究在相同晶粒度下两种Nb含量管材的拉伸性能,特别是Nb元素在GH4169合金组织的晶界处形成析出相造成的“钉扎”作用,选用合适的热处理制度,制备不同Nb含量的管材具有相同的晶粒

度,最终得到4.90%Nb管和5.30%Nb管的晶粒度保持一致,具体工艺如下。

4.90%Nb的管材:固溶温度为1 020℃,保温时间为10 min,管材晶粒度为7.0级;固溶温度为1 060℃,保温时间为10 min,管材晶粒度为6.0级;固溶温度为1 100℃,保温时间为10 min,管材晶粒度为5.0级;固溶温度为1 120℃,保温时间为10 min,管材的晶粒度为4.0级。

5.30%Nb的管材:固溶温度为1 040℃,保温时间为10 min,管材晶粒度为7.0级;固溶温度为1 080℃,保温时间为10 min,管材晶粒度为6.0级;固溶温度为1 120℃,保温时间为10 min,管材晶粒度为5.0级;固溶温度为1 140℃,保温时间为10 min,管材晶粒度为4.0级。

考虑到GH4169合金管材的时效温度在730℃,低于其奥氏体再结晶温度下,不会对GH4169合金管材的奥氏体晶粒有所影响,晶粒度不会长大。对具有相同晶粒度、不同Nb含量的管材进行时效热处理,其采用的时效热处理工艺相同,即为时效温度为730℃、时间5 h,研究在相同晶粒度、不同Nb含量的室温拉伸性能,结果见表4。由表4可见,随着平均晶粒尺寸的增大,管材抗拉强度和屈服强度随之降低,伸长率变化不大。

表4 2种Nb含量的不同晶粒度下的室温拉伸性能
Table 4 Tensile properties at room temperature under different grain sizes of 2 Nb contents

Nb/%	晶粒度/级	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%
4.90	7	1 300	1 050	25.0
	6	1 270	1 010	28.0
	5	1 220	968	31.0
	4	1 190	955	28.0
5.30	7	1 340	1 080	26
	6	1 305	1 020	25.5
	5	1 265	985	27.5
	4	1 235	960	28

3 结论

(1)两种不同Nb含量GH4169合金管材,采用相同的制造工艺,低Nb [$w(\text{Nb})$ 4.90%]成品管晶粒度为7.0级,高Nb [$w(\text{Nb})$ 5.30%]成品管晶粒度为9.0级,晶粒度相差2.0级。低Nb含量的管材只在晶界上析出 Ni_3Nb 相,高Nb的管材在晶界或晶内都析出 Ni_3Nb 相, Ni_3Nb 相对奥氏体晶粒的长大起到了“钉扎”作用,造成Nb元素含量越高,相同制造工艺

得到的管材平均晶粒尺寸越细小。

(2)GH4169合金的高Nb $[w(\text{Nb})5.30\%]$ 管材在室温和200℃高温下的抗拉强度、屈服强度都比低Nb $[w(\text{Nb})4.90\%]$ 管材高,伸长率基本保持不变。

(3)GH4169合金管材在两种不同Nb含量下,采用相同的时效热处理工艺。不论是低Nb $[w(\text{Nb})4.90\%]$ 还是高Nb $[w(\text{Nb})5.30\%]$ 管材,随着平均晶粒尺寸的增大,管材的抗拉强度、屈服强度下降,伸

长率变化不大。在相同的晶粒度下,高Nb $[w(\text{Nb})5.30\%]$ 管材比Nb $[w(\text{Nb})4.90\%]$ 管材的抗拉强度、屈服强度高,伸长率基本一致。

(4)Nb含量的不同不仅对GH4169合金管材的金相组织有影响,对室温拉伸和200℃高温拉伸的性能也有较大的影响,因此,在制备不同Nb含量的管材时,选择合适的固溶时效热处理工艺是非常有必要的。

参考文献

- [1] 师昌绪,仲增墉.中国高温合金40年[J].金属学报,1997,33(1):1-8.
- [2] Kurt P. Rohrbach.高温合金的发展与选择[J].宇航材料与工艺,2005,35(1):61-62.
- [3] 杜金辉,邓群,董建新.我国GH4169合金的发展与应用[A].见原:师昌绪,仲增墉主编.中国高温合金五十年[C].第1版.北京:北京工业出版社,2006:1.
- [4] 徐强,张幸红,韩杰才,等.先进高温材料的研究现状和展望[J].固体火箭技术,2002,25(3):51-55.
- [5] 丁天胜,张显程,涂善东,等.热处理对GH4169合金组织及650℃下低周疲劳性能的影响[J].材料热处理学报,2016,37(4):69-75.
- [6] 孔永华,李龙,陈国胜,等.不同热处理工艺对GH4169合金组织及性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2010,39(S1):472-475.
- [7] 魏先平,郑文杰,宋志刚,等.热处理对Inconel718合金组织及力学性能的影响[J].材料热处理学报,2012,33(8):53-58.
- [8] 白亚冠,李红梅,韩秀栋,等.GH4169合金 δ 相析出与溶解行为研究[J].特殊钢,2021,42(5):21-25.
- [9] 韦家虎,董建新,喻健,等. δ 相对GH4169合金热变形行为的影响[J].航空材料学报,2012,32(6):72-77.
- [10] 张海燕,张士宏,程明,等. δ 相对GH4169合金热变形后热处理中晶粒长大的影响[J].材料热处理学报,2017,38(3):70-75.
- [11] 刘芳,孙文儒,杨树林,等.Al含量对GH4169镍基合金组织及其稳定性的影响[J].金属学报,2008,44(7):791-798.
- [12] 蔡大勇.GH169及GH696高温合金热加工工艺基础研究[D].秦皇岛:燕山大学,2003.
- [13] 孔永华,刘瑞毅,陈国胜,等.不同固溶处理对GH4169合金常温拉伸性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2012,41(S2):616-620.
- [14] 朱丽娜.GH4169G合金显微组织和力学性能研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2011.

版权声明

根据《中华人民共和国著作权法》,作者向《特殊钢》编辑部投稿(或接受约稿),全体作者同意,上述提交本刊发表的作品一经本刊录用,作者即将作品整体以及附属于作品的图、表、摘要或其他可以从作品中提取部分的全部版权——包括但不限于复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权、改编权,在著作权保护期内转让给《特殊钢》编辑部。本刊所付一次性稿酬已包含上述各种稿酬,若编辑部再以其他形式在任何地点出版该论文,将不再支付作者稿酬。

作者应保证论文是作者独立创作的原创性作品,未曾发表;不涉及侵权和泄密问题;保证论文没有一稿多投;保证论文的署名权无争议,若发生问题,一切责任由作者承担,文责自负。如有异议,请在投稿前说明,本刊即时处理。