

· 综述 ·



Nb在变形高温合金中的作用

王志刚^{1,2}, 王立², 曹政²

(1 钢铁研究总院高温材料研究所, 北京 100081; 2 大冶特殊钢有限公司技术中心, 黄石 435001)

摘要:以载入《中国高温合金手册(2012年版)》的经过国家验收、鉴定或批量生产的变形高温合金为主要研究对象,通过大量的文献调研,总结了Nb在变形高温合金中的作用。总结表明,在高温合金中,Nb既是主要的固溶强化元素,又是主要的沉淀强化元素。在固溶强化型高温合金中,Nb主要形成NbC、Z-(Ni_{0.04}Cr_{0.83}Fe_{0.13})_{1.9}(W_{0.15}Mo_{0.09}Nb_{0.76})_{3.3}N等相,显著提高合金的蠕变强度,降低蠕变速率,同时能保证合金良好的焊接工艺性能;在沉淀强化型高温合金中,主要形成γ'-Ni₃(Al,Ti)相、γ''-Ni₃Nb相、δ-Ni₃Nb相、ε-Ni₃(Nb,Ti)相、Laves-(FeCoNi)_{1.84}(NbTiSi)相等,通过控制析出相尺寸、形貌和分布的变化来获得良好的综合性能。目前有接近30%的变形高温合金均采用Nb元素进行强化,现代高温合金材料的发展已经离不开Nb元素。

关键词:Nb; 变形高温合金; 固溶强化型高温合金; 沉淀强化型高温合金

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2022-00241 **中图分类号:**TG113. 12

The Role of Nb in Deformed Superalloys

Wang Zhigang^{1,2}, Wang Li², Cao Zheng²

(1 High Temperature Materials Research Institute of Beijing Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2 Technical Center of Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China)

Abstract: In this paper, the main research object is the deformed superalloys that have passed the national acceptance, identification or batch production, which are included in the China Superalloy Manual (2012 edition), through a large number of literature research, the role of Nb in deformed superalloys is summarized. The results show that Nb is not only the main solution strengthening element, but also the main precipitation strengthening element in superalloys. In the solution strengthened superalloy, NbC and Z-(Ni_{0.04}Cr_{0.83}Fe_{0.13})_{1.9}(W_{0.15}Mo_{0.09}Nb_{0.76})_{3.3}N are mainly Nb formed, which can significantly improve the creep strength of the alloy, reduce the creep rate, and ensure the good welding process performance of the alloy; In precipitation strengthened superalloys γ'-Ni₃(Al, Ti), γ''-Ni₃Nb, δ-Ni₃Nb, ε-Ni₃(Nb, Ti) and Laves-(FeCoNi)_{1.84}(NbTiSi) etc are mainly Nb formed, and good comprehensive properties can be obtained by controlling the changes of the size, morphology and distribution of the precipitated phase. At present, nearly 30% of deformed superalloys are strengthened by Nb, and the development of modern superalloy materials has been inseparable from the participation of Nb.

Key Words: Nb; Wrought Superalloy; Solid Solution Strengthened Superalloy; Precipitation Strengthened Superalloy

高温合金是以铁、钴、镍为基体,可在600℃以上复杂应力条件下长期服役,具有表面稳定性的奥氏体金属材料。按照成型方式可分为变形、铸造和粉末三大类,其中变形高温合金牌号最多、应用最为广泛^[1]。Nb在高温合金中既有固溶强化作用,又有沉淀强化作用,变形高温合金有30%以上通过Nb进行强化。特别是在高温合金市场中需求量最大的GH4169和GH3625合金及其同类合金中,Nb含量都在3.5%以上。本文对载入《中国高温合金手册(2012版)》^[2](以下简称“手册”)的77个已经通过国家验收、鉴定或批产的变形高温合金品种进行了梳理,详细介绍了Nb元素在变形高温合金中的强化机理和作用。

1 Nb与变形高温合金的发展概况

铌^[3],化学符号Nb,原子序数41,是一种过渡金属元素。在地壳中的含量大约为0.002%,可开采储量440万吨,世界最大矿藏位于巴西米纳斯吉拉斯州,属于CBMM^[4](巴西矿物冶金公司)。1864年,瑞士化学家德马里尼亚首次通过还原反应制成金属铌,直到20世纪初,铌有了商业上的应用。1920年,人们发现了Nb元素对钢材的强化作用。此后,伴随着钢铁工业的不断发展,钢铁材料成为Nb最大的消费领域^[5]。特别是在目前常用的高温合金中,大约有50多种合金通过Nb元素进行强化^[6-7]。

1941年,英国开发出了世界上第一个高温合金

Nimonic75, 经过 80 多年的发展, 美国、俄国、英国和中国成为国际高温学界公认的具有完整高温合金体系的 4 个国家。中国从 1956 年开始, 经过几十年的发展, 目前已经有 200 多个高温合金牌号^[8-9]。其中 22 个常用的变形高温合金采用 Nb 元素进行强化。特别需要指出的是, 在变形高温合金中应用市场最广、年消费量最大的 GH4169 和 GH3625 合金均采用 Nb 元素进行强化。

2 Nb 在变形高温合金中的应用

2.1 Nb 在固溶强化型高温合金中的应用

Nb 原子半径比 W、Mo 大, 与 Fe、Co、Ni 基体具有更大的晶格错配度, 因此, Nb 的固溶强化作用更明显。“手册”收录的 23 个固溶合金中, 有 5 个采用 Nb 元素进行固溶强化^[10-11], 见表 1。它们都具有出色的力学性能见表 2。在 GH1140 合金的基础上增加 1.5% 的 Nb 进行复合强化而自主研发出的 GH1015 合金, 通过 MC 和 M₆C 型碳化物进行强化, 使用温度比 GH3030 要高出 100 °C 以上^[12]。GH3039 合金中含有少量的 Ti(CN)、NbC 和 M₂₃C₆ 型碳化物, 在 1 000 °C 以下长期使用有良好的组织稳定性^[13]。

在含 N 的高温合金产品中, Nb 元素通过形成氮化物 Z 相来达到有效阻止晶粒长大, 细化奥氏体晶粒的目的。Z 相具有四方点阵结构, $a = 0.678 \text{ nm}$, $c = 0.739 \text{ nm}$, 化学成分为 $(\text{Ni}_{0.04}\text{Cr}_{0.83}\text{Fe}_{0.13})_{1.9}(\text{W}_{0.15}\text{Mo}_{0.09}\text{Nb}_{0.76})_{3.3}\text{N}$, 在 900 °C 以下具有优异的高温稳定性^[14]。经 $(1\ 160 \pm 10)^\circ\text{C} \times 1 \text{ h}$, AC(空冷)标准热处理后, GH1016 合金中含有大约 2% 的一次 Z 相, 长期时效后析出二次 Z 相, 数量可达到 3% ~ 5%。GH1131 合金中 Nb 含量相对偏低, 按标准热处理 $(1\ 160 \pm 10)^\circ\text{C} \times 1 \text{ h}$, AC 后, NbC 和 Z 相总量在 1.5%

左右^[15]。

GH3625 合金是含 Nb 最高的固溶强化型合金, 具有良好的工艺性能、综合力学性能和抗腐蚀性能, 可广泛应用于制造航空发动机零部件、宇航结构部件和各种化工设备^[16-17]。其发明者 H. L. Eiselstein 和 J. Gadbut 通过正交析因试验证明: Nb 在 Ni 基体中的最大固溶度是 2%, 当 Nb 含量 < 2% 时, 强化效应非常微弱, 进一步增加 Nb 含量可以降低奥氏体基体的堆垛层错能, 显著提高合金的蠕变强度, 降低蠕变速率^[18]。图 1、图 2 显示了在 GH3625 合金基体成分的基础上, 通过改变 Cr、Mo、Nb 含量来测试各元素对合金 816 °C 塑性应变和蠕变强度的影响, 结果显示 Nb 的影响效果最为明显。当 Nb 含量 > 4% 时, 会产生明显的沉淀强化现象, 违背了合金设计的初衷, 因此 Nb 含量设计最后固定在 3.15% ~ 4.15%, Nb 的存在还保证了合金良好的焊接工艺性能。

据北京钢铁研究总院的市场调研信息, 国内 GH3625 合金的年需求量已经达到 5 000 t 以上, 主要是线材。该合金类似美国 Inconel 625 (625 合金), Nb 的固溶强化作用在其中得到了非常好的体现。它不仅具有优异的工艺性能和使用性能, 具有广阔的市场应用前景。同时它也是一个非常优异的“种子”, 在其基础上衍生出很多高端的材料, 表 3 列举了 625 合金及其部分衍生产品的典型化学成分^[18]。它们不仅充分利用了 Nb 元素优异的固溶强化作用, 同时将 Nb 作为重要的沉淀强化元素加以利用, 获得了更好的耐蚀耐高温性能和更广阔的应用前景。

2.2 Nb 在沉淀强化型高温合金中的应用

Nb 不仅具有非常好的固溶强化效果, 同时也是

表 1 含 Nb 固溶强化型高温合金的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of Nb containing solid solution strengthened superalloy												%	
合金	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb	V	N	
GH1015	≤0.08	19.00 ~ 22.00	34.00 ~ 39.00	-	4.80 ~ 5.80	2.50 ~ 3.20	-	-	余	1.10 ~ 1.60	-	-	
GH1016	≤0.08	19.00 ~ 22.00	32.00 ~ 36.00	-	5.00 ~ 6.00	2.60 ~ 3.30	-	-	余	0.90 ~ 1.40	0.10 ~ 0.30	0.13 ~ 0.25	
GH1131	≤0.10	19.00 ~ 22.00	25.00 ~ 30.00	-	4.80 ~ 6.00	2.80 ~ 3.50	-	-	余	0.70 ~ 1.30	-	0.15 ~ 0.30	
GH3039	≤0.08	19.00 ~ 22.00	余	-	-	1.80 ~ 2.30	0.35 ~ 0.75	0.35 ~ 0.75	≤3.00	0.90 ~ 1.30	-	-	
GH3625	≤0.10	20.00 ~ 23.00	≥58.00	≤0.20	-	8.00 ~ 10.00	≤0.40	≤0.40	≤5.00	3.14 ~ 4.15	-	-	

表 2 含 Nb 固溶强化型高温合金的典型力学性能
Table 2 Typical mechanical properties of solid solution strengthened superalloy containing Nb

合金	固溶温度 / $^{\circ}\text{C}$	冷却方式	实验温度 / $^{\circ}\text{C}$	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 A/%	断后面缩率 Z /%
GH1015	1 140 ~ 1 170	AC	室温	≥ 665	-	≥ 35	≥ 40
		AC	700	≥ 390	-	≥ 30	≥ 35
		AC	900	≥ 175	-	≥ 40	≥ 45
GH1016	1 150 ~ 1 170	AC	室温	≥ 705	-	≥ 35	≥ 40
		-	750	≥ 390	-	≥ 30	≥ 35
		-	900	≥ 185	-	≥ 40	≥ 45
GH1131	1 150 ~ 1 170	AC	室温	≥ 735	≥ 345	≥ 32	≥ 40
		AC	900	≥ 186	-	≥ 40	≥ 45
		AC	1000	≥ 110	-	≥ 50	≥ 50
GH3039	1 050 ~ 1 080	AC	室温	≥ 700	-	≥ 40	-
		AC	800	≥ 245	-	≥ 40	实测
GH3625	950 ~ 1 030	AC	室温	≥ 930	≥ 415	≥ 30	实测

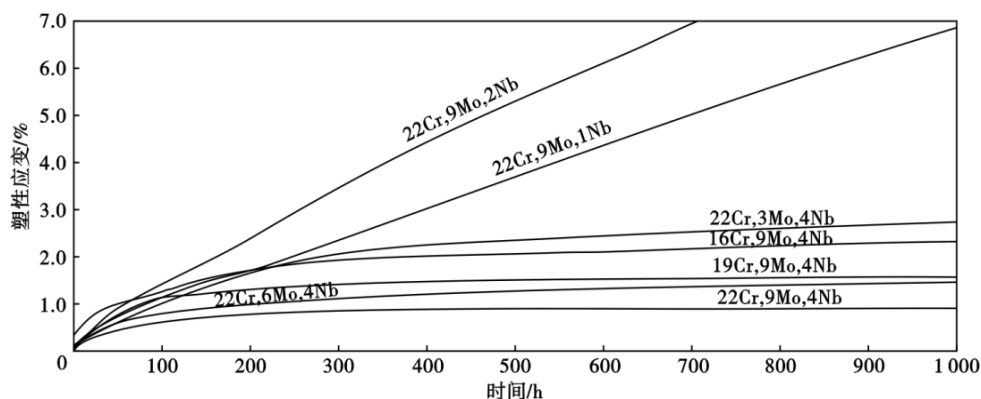


图 1 Nb 对 GH3625 合金塑性应变的影响(816 $^{\circ}\text{C}$ /52 MPa)
Fig. 1 Effect of Nb on plastic strain of GH3625 alloy (816 $^{\circ}\text{C}$ /52 MPa)

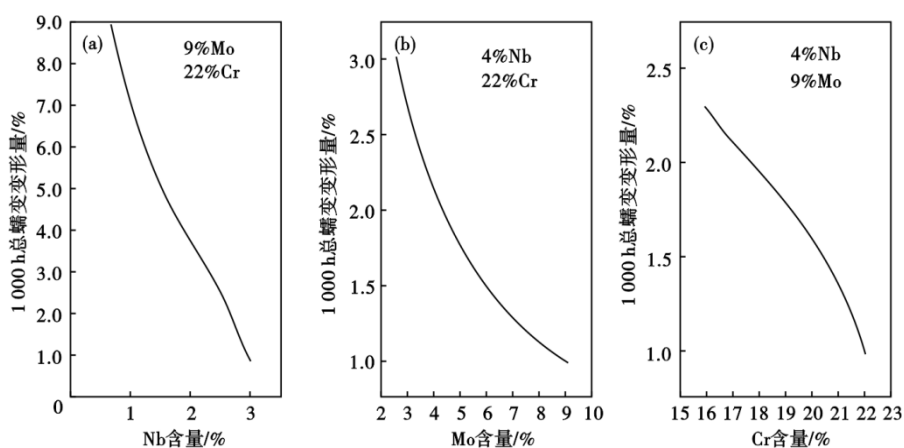


图 2 强化元素对 GH3625 合金蠕变强度的影响(816 $^{\circ}\text{C}$ /66 MPa): (a) Nb, (b) Mo, (c) Cr
Fig. 2 Effect of strengthening elements on creep strength of GH3625 alloy (816 $^{\circ}\text{C}$ /66 MPa) : (a) Nb , (b) Mo , (c) Cr

沉淀强化相的主要形成元素。“手册”收录的 53 个沉淀强化型高温合金, 17 个需要通过 Nb 进行强化。Nb 主要通过形成 γ' 相、 γ'' 相、 δ 相、 ε 相、Laves 相等

来参与沉淀强化作用^[8, 19-20]。在这些常用的沉淀强化型高温合金中, 含 Nb 量最高的就是 GH4169 合金, 其次是 GH2907 和 GH2909 合金, 见表 4, 它们有

表 3 625 合金及其衍生产品的典型化学成分(质量分数)

Table 3 Typical chemical composition of 625 alloy and its derivative products

合金	C	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Fe	Nb	其余
625	0.06	21.50	61.00	9.00	0.20	0.20	2.50	3.60	-
625PLUS	0.01	21.00	61.00	8.00	0.20	1.30	2.50	3.40	N≤0.02
725	0.01	21.00	57.00	8.00	0.25	1.50	9.00	3.50	-
718	0.04	19.00	52.50	3.00	0.50	0.90	18.50	5.10	B:0.002
706	0.03	16.00	41.50	-	0.20	1.75	40.00	2.90	-
Rene 220	0.04	19.00	52.50	3.30	0.50	1.00	余	5.10	B:0.005; Co:12.0
PWA 1472	0.04	12.00	58.00	3.00	0.60	2.00	18.0	6.00	B:0.002

非常优异的力学性能,见表5。

在 GH4169 合金中, Nb 的主要作用是形成 γ'' -Ni₃Nb 相, γ'' 具有有序的体心四方结构(DO₂₂), 点阵常数 a=0.362 4 nm、c=0.740 6 nm, 相比于 γ' 相, 它与 γ 基体保持着更高的错配度, 对力学性能的影响更加明显。当 w[Nb] 在 4.99% ~ 5.50% 之间变化时, 随着 Nb 的增加, 会析出更多的 γ'' 相, 如图 3 所示。特别是 650 °C 的高温拉伸强度逐步提升, 但相应的塑性不受影响^[21], 如图 4 所示。因此, 航空涡轮盘等转动件材料一般都采用接近标准上限的 Nb 含量, 以获得更好的高温强度和和使用性能。

在 GH4169 合金中 Nb 的另一个作用是形成有益的 δ -Ni₃Nb 相, δ 相具有正交有序结构, 晶格常数 a=0.510 6 nm, b=0.425 1 nm, c=0.455 6 nm。它是一种稳定的共格结构, δ 相的析出能起到钉扎晶界, 阻止晶粒长大的作用, 适量的 δ 相可以降低合金

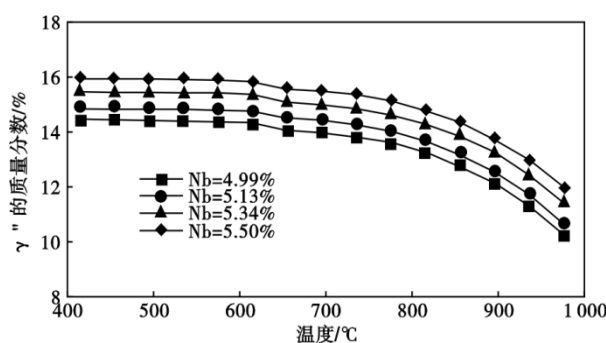


图 3 Nb 含量对 GH4169 合金不同温度 γ'' 相质量分数的影响 (数值模拟结果)

Fig. 3 Effect of Nb content on the mass fraction of γ'' phase at different temperatures of GH4169 alloy (numerical simulation results)

的缺口敏感性, 提高持久性能, 但是过量的 δ 相会成为裂纹萌生和发展的通道, 使合金性能恶化^[22-25]。 δ 相的适量析出最好通过控制锻造工艺来实现。

表 4 部分含 Nb 沉淀强化型高温合金的主要化学成分(质量分数)

Table 4 Main chemical compositions of some precipitation strengthened superalloys containing Nb

合金	C	Cr	Ni	Co	Mo	Al	Ti	Fe	Nb	Si
GH2907	≤0.06	≤1.00	35.00~40.00	12.00~16.00	-	≤0.20	1.30~1.80	余	4.30~5.20	0.07~0.35
GH2909	≤0.06	≤1.00	35.00~40.00	12.00~16.00	-	≤0.20	1.30~1.80	余	4.30~5.20	0.25~0.50
GH4169	0.02~0.08	17.00~21.00	50.00~55.00	-	2.80~3.30	0.30~0.70	0.75~1.15	余	4.75~5.50	≤0.35

表 5 部分含 Nb 沉淀强化型高温合金的典型力学性能要求

Table 5 Main mechanical properties of some precipitation strengthened superalloys containing Nb

合金	热处理制度*	实验温度/°C	抗拉强度 R _m /MPa	屈服 R _{p0.2} /MPa	断后伸长 A/%	断后面缩率 Z/%
GH2907	980 °C±15 °C×1 h, AC;	室温	≥1 035	≥725	≥5.0	≥7.5
	775 °C±15 °C×12 h/FC(55 °C/h) →620 °C±15 °C×8 h, AC	540	≥825	≥585	≥12	≥30
GH2909	980 °C±15 °C×1 h, AC;	室温	≥1 205	≥965	≥8	≥12
	775 °C±15 °C×12 h/FC(55 °C/h) →620 °C±15 °C×8 h, AC	650	≥930	≥720	≥10	≥15
GH4169	950~980 °C±10 °C×1 h, AC;	室温	≥1 275	≥1 035	≥12	≥15
	720 °C±15 °C×8 h/FC(55 °C/h) →620 °C±15 °C×8 h, AC	650	≥1 000	≥860	≥12	≥15

注: *表中“FC”代表炉冷, 本文下同

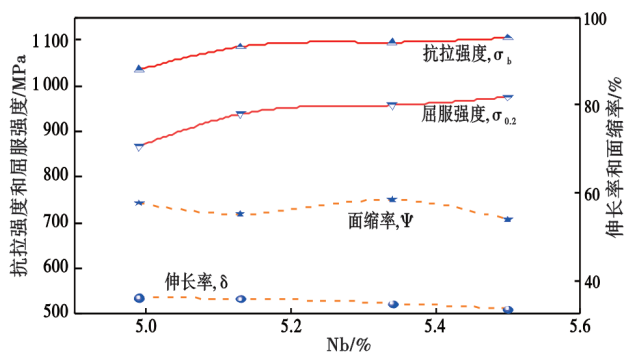


图4 Nb含量对GH4169合金650 °C拉伸性能的影响

Fig. 4 Effect of Nb content on tensile properties of GH4169 alloy at 650 °C

GH4169合金在650 °C以下具有较高的强度,良好的抗疲劳、抗辐射、抗氧化和耐腐蚀性,可广泛应用于航空、航天、核能和石油化工等领域,是目前年需求量最大的高温合金品种。例如:在现代航空发动机中,高温合金材料占发动机总重量接近50%^[26],其中45%以上是GH4169合金。仅在装备歼击机的第三代大型发动机中,该合金的零件种类达到160余种^[27]。

在GH2907和GH2909合金中,Nb主要形成 γ' - $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Ti})$ 相,沿基体[001]晶带轴析出,面心立方结构(L1₂型),与基体共格(γ' 相晶格常数 $a=0.3540\sim0.3627\text{ nm}$,基体晶格常数 $a=0.3608\text{ nm}$),呈球形或正方形^[28-29],析出温度为540~760 °C。 γ' 相数量是决定高温合金强度的主要因素,所以,通常情况下,数量越多,强化效果会越好。GH2907合金经过标准热处理(980 °C±15 °C×1 h, AC+775 °C±15 °C×12 h/FC(55 °C/h)→620 °C±15 °C×8 h, AC)后, γ' 相数量 $\omega(\gamma')\approx 15.2\%$ 。其尺寸也是决定沉淀强化效果的一个重要参数,在数量一定时, γ' 相存

在一个临界尺寸,小于临界尺寸,位错切割机制起主要作用, γ' 相越大,强化效果越好。超过临界尺寸,Orowan机制起主要作用, γ' 相越大,强化效果越差。GH2909合金经过标准热处理(980 °C±15 °C×1 h, AC+980 °C±15 °C×1 h, AC+720 °C±15 °C×8 h/FC(55 °C/h)→620 °C±15 °C×8 h, AC)后,可以获得比GH2907合金更高的强度。其中720 °C主要是析出尺寸较大的方形 γ' 相,对合金强度起决定性作用,620 °C主要是补充析出尺寸较小的球形 γ' 相,可以进一步提高合金强度,但更多的是起协调晶粒变形,优化合金塑性的作用^[30]。

由于GH2907合金和GH2909合金中不含Al, γ' - $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Ti})$ 相稳定性较差,在较高温度和较长时间下时效, γ' 相会转换成相对稳定的 ε - $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Ti})$ 相。研究表明, ε - $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Ti})$ 相的晶体结构与Si含量有关。当Si含量较低时, ε 相具有 $\text{DO}_{19}\text{Ni}_3\text{Zn}$ 型密排六方结构^[31],晶格常数为 $a=0.5177\text{ nm}$ 、 $c=0.4169$ 。当Si含量达到0.40%以上时, ε 相具有正交晶系结构^[32], $a=0.4500\text{ nm}$ 、 $b=0.8000\text{ nm}$ 、 $c=1.200\text{ nm}$ 。在<770 °C时效, ε 相会通过逐渐消耗 γ' 相转化析出。当720 °C时效8 h后,观察到 γ' 相在某些区域聚集成板状,当720 °C时效50 h后, γ' 相尺寸增加,数量减少, ε 相变粗,数量增加。两相相交形成典型的魏氏体形态如图5所示^[33-34]。在≥770 °C时效, ε 相会直接从过饱和奥氏体中析出,大部分呈“双胞”结构生长如图6所示。 ε 相的存在可以起到抑制高温应力状态下氧原子沿晶界的扩散,大幅度改善合金的高温持久性能^[35-36]。但是过量的 ε 相析出,一方面会消耗大量的Nb,降低合金强度,另一方面会阻碍晶内滑移变形,对合金的拉伸塑性产生不利的影响。

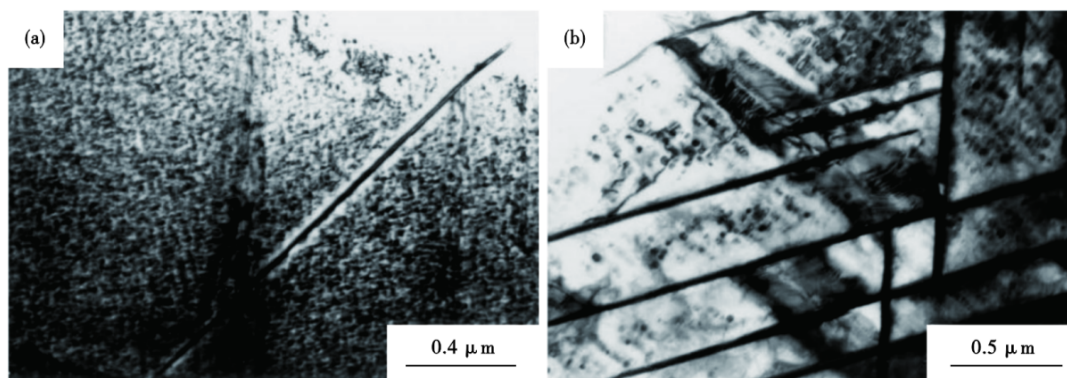


图5 GH2909合金720 °C时效后的组织:(a)8 h,(b)50 h

Fig. 5 Microstructure of GH2909 alloy aged at 720 °C: (a) 8 h, (b) 50 h

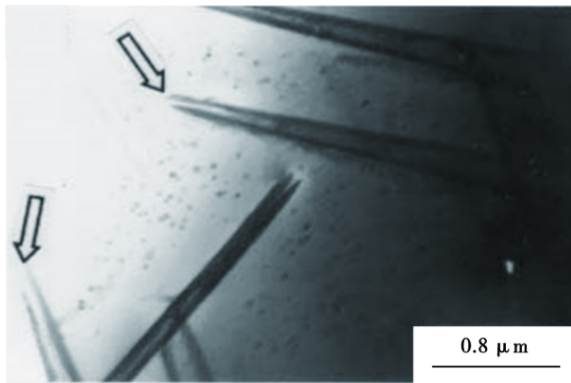


图6 GH2909合金770 °C时效10 h后的组织

Fig. 6 Microstructure of GH2909 alloy aged at 770 °C for 10 h

Laves相是 AB_2 型化合物,A和B原子直径比为1.225,是一种拓扑密排相。一般情况下,在含铁量较高的合金中更加容易析出。针状(片状)Laves相通常是裂纹形核和扩展的通道,从而明显降低合金的持久强度和室温塑性。颗粒状的Laves相,如果数量少,一般对力学性能没有明显影响;如果数量较多,会消耗大量的Cr、Mo、Ti、Nb等元素,从而降低合金的固溶强化效果,造成力学性能恶化。因此,在大部分高温合金中,Laves相都作为有害相对待,但是在GH2909合金中,Laves相可以起到抑制晶界迁移,控制晶粒尺寸的作用。特别是当Laves相沿晶界分布,可阻止氧原子沿晶界扩散而形成脆性氧化层,从而有效阻止持久缺口敏感性的产生,提高合金的持久性能^[32]。Laves相为六方结构, $a=0.4520\text{ nm}$, $c/a=1.62$ 。化学组成为 $(\text{FeCoNi})_{1.84}(\text{NbTiSi})$,相中含有Si的原子百分比为8%,对应基体中Si的原子百分比为1%,正是因为Si元素的存在,促进了Laves相的析出,析出温度为 $800\sim 1040\text{ °C}$ ^[36-37]。

GH2907和GH2909合金具有较高的强度,低的热膨胀系数,良好的抗冷热疲劳性能和几乎恒定不变的弹性模量,被广泛用于制作 650 °C 以下使用的各类航空、航天发动机环件和机匣,特别是GH2909合金具有更好的强度性能。目前国内低膨胀高温合金的年需求量已超过700 t,随着GH2909合金材料质量的稳定及应用市场的推广,十年内,国内低膨胀高温合金的年需求量有望达到2000 t以上。

2.3 Nb在未来高温合金中的应用展望

在大部分依靠Nb合金化的变形高温合金中,如GH6783、GH4648、GH4698、GH4742、GH2150、

GH4099等合金,Nb都是形成 γ' 相的主要组成元素,适量的Nb不仅为合金提供了优异的强度性能,而且保障了合金良好的焊接性能和工艺性能。这些合金在航空航天发动机、地面燃气轮机、超超临界发电机组等高精尖技术领域都有非常成功的应用^[38]。由于Nb具有良好的固溶强化作用和沉淀强化作用以及可以为高温合金提供良好工艺性能和焊接性能保障,现代高温合金材料的发展已经离不开Nb元素。

Nb是支持高温合金发展的重要强化元素,主要分布在 γ 基体以及 γ' 相和 γ'' 相中,不仅可以起到有效的沉淀强化作用,也是非常重要的固溶强化元素,一部分Nb还可以形成弥散分布的碳化物,起到抑制晶粒长大的作用。Nb的加入可以使 γ' 相和 γ'' 相的反相畴界能增加,大幅度提高合金的屈服强度和持久蠕变性能,从而提高合金的使用温度。在一定程度上还可以作为战略贵金属元素Ta的替代品。随着未来航空工业的发展,发动机对材料使用温度的要求越来越高,越来越多的新型高温合金产品将引入Nb进行复合强化,Nb在高温合金中的使用比例也会越来越高。但是由于Nb是严重的枝晶间偏析元素,同时也是Laves相等拓扑密排相的形成元素,因此,在高Nb含量高温合金的开发过程中,将会给含Nb高温合金大锭型冶炼工作带来更大的挑战。

3 结论

(1)Nb在高温合金中,既是主要的固溶强化元素,也是主要的沉淀强化元素,在通过国家鉴定、验收或批产的变形高温合金中,近30%的牌号需要通过Nb进行强化。

(2)Nb在固溶强化型高温合金中主要形成NbC相、Z相等,可以显著提高合金的蠕变强度,降低蠕变速率,同时能保证合金良好的焊接工艺性能。

(3)Nb在沉淀硬化型高温合金中主要形成 γ' 相、 γ'' 相、 δ 相、 ϵ 相、Laves相等,通过控制析出相尺寸、形貌和分布的变化来获得良好的综合性能。

(4)含Nb最高的固溶强化型高温合金GH3625,含Nb量为3.5%;含Nb最高的沉淀强化型高温合金GH4169,含Nb量为5.0%;它们占据国内高温合金市场需求量的前两名。特别是随着对Nb强化作用研究的不断深入,越来越多的新型高温合金采用Nb进行强化,高Nb含量高温合金的开发,在获得更优异性能的同时,也将给大锭型冶炼工作带来更大的挑战。

参考文献

- [1] 黄乾尧,李汉康. 高温合金[M]. 北京:冶金工业出版社. 2000: 4-7.
- [2] 中国高温合金手册[M]. 北京:中国标准出版社,中国质检出版社. 2012.
- [3] 蓝 兰. 铌[M]. 北京:中国工业出版社. 1964:5-12.
- [4] 幸良佐. 国外钼铌工业发展概况[J]. 江西冶金, 1982, 02(1): 66-69.
- [5] 郭青蔚. 铌在钢铁工业中的应用[J]. 稀有金属快报, 2005, 23(3):31-34.
- [6] Xie Xishan. An Overview of Nb-Containing Superalloys in China [A]. 40 th Anniversary-Niobium Science and Technology Cooperation-China and Brazil (1979-2019):323-338.
- [7] Hunsicker H Y, Stumpf H C. History of precipitation hardening [R]. The Sorby Centennial Symposium on the History of Metallurgy. 1965.
- [8] Sims C T. A History of Superalloy Metallurgy for Superalloy Metallurgists[R]. Superalloys. 1984.
- [9] 郭建亭. 高温合金材料学(上册)[M]. 北京:科学出版社. 2008:46-48.
- [10] 李 烁, 闫 森, 金奎文, 等. 碳含量及热加工变形量对镍基合金GH3625组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 75-78.
- [11] 黄福祥. 燃烧室用GH15铁基高温合金[J]. 航空材料, 1980, 24(6):4-7.
- [12] 王 立, 王志刚, 牛建科, 等. 固溶处理对GH2036合金组织和硬度的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(6): 61-64.
- [13] 方 前, 赵 琳, 张大越, 等. 电弧增材制造GH3039组织和性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(3):1141-1144.
- [14] 王志刚, 祖国胤, 程 俊, 等. 热处理对GH1016合金组织和性能的影响[J]. 材料与冶金学报, 2015, 14(2):144-148.
- [15] 浦惠康, 田沛玉. 硼对GH1131合金拉伸性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(S2):33-35.
- [16] 王志刚, 田水仙, 韩 魁. GH3625合金轧制过程中的晶粒组织演化[J]. 金属功能材料, 2018, 25(4):45-49.
- [17] 王志刚, 杨玉军, 田水仙, 等. 冷拔变形对GH3625合金组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(S2):92-95.
- [18] Eiselstein H L, Tillack D J. The Invention and Definition of Alloy 625[R]. The Minerals, Metals & Materials Society, 1991.
- [19] Guo Xiping, Kiyoshi Kusabiraki, Shigeoki Saji. Intragranular precipitates in Incoloy Alloy 909[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(1):55-60.
- [20] WuYuting, Li Chong, Xia Xingchuan, et al. Precipitate coarsening and its effects on the hot deformation behavior of the recently developed γ' -strengthened superalloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 67(8):95-104.
- [21] 胡仁民, 信 欣. Nb含量对GH4169合金组织和拉伸性能的影响[J]. 宝钢技术, 2020, 37(2):32-35+39.
- [22] 崔文明, 张京玲, 张 瑞. 不同热处理工艺对GH4169合金析出的影响[J]. 世界有色金属, 2021, 35(2):128-129.
- [23] 韦 康, 王 涛, 张明军, 等. 重复固溶对Inconel 718合金组织性能的影响[J]. 航空材料学报, 2021, 41(1):53-59.
- [24] 刘永飞, 刘宏亮, 赵献益, 等. 固溶时效对Inconel718合金组织和力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2016, 40(3):49-51+56.
- [25] 白亚冠, 李红梅, 韩秀栋, 等. GH4169合金 δ 析出与溶解行为研究[J]. 特殊钢, 2021, 42(5): 21-25.
- [26] 灵动核心产业研究中心. 中国高温合金行业市场研究成果 [R]. 北京:灵核网, 2018:70.
- [27] 庄景云, 杜金辉, 邓 群. 变形高温合金GH4169组织与性能 [M]. 北京:科学出版社, 2011, 129-130.
- [28] 杨良会, 卢 熠, 吴永安, 等. GH907环形锻件锻造工艺研究 [J]. 锻造与冲压, 2019(23):60-63.
- [29] Kusabiraki K, Amada E, Ooka T. Precipitation and growth of γ' phase in an Fe-38Ni-13Co-4.7Nb superalloy [J]. ISIJ International, 1996, 36:208.
- [30] Balachander, Vishwakarma, Tang, et al. Microstructure characterization of solution treated (ST) and solution treated and aged (STA) Incoloy 909[J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(4):805-809
- [31] Heck K A, Smith D R, Smith J S, et al. The physical metallurgy of a silicon-containing low-expansion superalloy [A]. Superalloys 1988—Proceedings of the Sixth International Symposium on Superalloys [C]. Warrendale, PA: Metallurgical Society, Inc., 1988:151-157.
- [32] Chen Z, Brooks J W, Loretto M H. Precipitation in Incoloy alloy 909 [J]. Materials Science and Technology, 2013, 9(8): 647-652.
- [33] Guo Xiping, Kiyoshi Kusabiraki, Shigeoki Saji. Intragranular precipitates in Incoloy Alloy 909[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(1):44-45.
- [34] 刘 瑛, 邓 波, 陈滢生, 等. 析出相在GH907低膨胀合金中的作用[J]. 材料工程, 1997, 41(11):27-30.
- [35] 王志刚, 文嘉利, 杨贵新, 等. 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[J]. 特殊钢, 2021, 42(4):17-19.
- [36] 韩光炜, 王信才, 王志刚, 等. Laves相分布对GH2909合金持久缺口敏感性的影响[A]. 中国金属学会高温材料分会. 第十四届中国高温合金年会论文集[C]. 中国金属学会高温材料分会:中国金属学会, 2019:7-10.
- [37] 崔 毅, 张云飞, 吕 达, 等. 高温扩散热处理对Ni-24Fe-14Cr-8Mo镍基合金显微组织的影响[J]. 特殊钢, 2020, 41(6):72-76.
- [38] 李 阳, 李 莎, 王 岩. 固溶处理对GH4700镍基合金管组织及力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2013, 34(3): 64-66.