

不同时效处理对GH4169合金组织性能的影响

牛 静¹,张凡云¹,杨树林²,王 蔓¹,赵 智¹,刘 晶¹

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司技术中心,沈阳 110044;

2. 中国航发沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司军代表室,沈阳 110044)

[摘要] 为了解GH907合金时效制度对GH4169合金组织和性能的影响,对分别进行GH907和GH4169两种时效处理后的GH4169合金进行组织、力学性能的对比分析与测试。结果表明,相对于GH4169时效处理,775℃时效处理使GH4169合金的 δ 相的析出量有所增加, γ' 、 γ'' 相略有长大,但合金的晶粒度没有发生明显变化。经775℃时效GH4169的缺口持久性能基本不变,不存在缺口敏感,但其室温和650℃抗拉强度、屈服强度、光滑持久寿命以及硬度均有所降低。

关键词: GH4169合金;时效处理;力学性能

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.20.045



牛 静

高级工程师,主要从事航空零件热处理工作。发表论文10余篇,授权专利5项,承担参与科研攻关20余项。

GH4169合金在650℃以下具有良好的抗热疲劳、氧化性能、较高的高温强度和良好的持久性能,被广泛应用于制造航空发动机、工业燃气轮机等高温结构部件^[1-3]。GH4169合金由 γ 基体、 γ' 、 γ'' 、 δ 相和碳化物^[4-5]组成,合金的性能主要受 γ' 、 γ'' 、 δ 相的形态、分布及数量的影响,不同的加工工艺及热处理工艺对合金的晶粒度、强化相的沉淀或溶解、析出相的数量和颗粒尺寸甚至晶界状态均可产生影响^[6-11]。

发动机某机匣组合件由GH4169和GH907两种合金焊接而成,该组合件主要受径向拉力作用,孔处受力最大,这就要求材料有较高的抗缺口敏感性,该组合件需要采用GH907时效制度进行时效,但是对于采用GH907时效制度对GH4169的力学性能和组织变化的影响,至今没有相关研究报道,而研究的内容多数围绕

固溶温度对GH4169合金性能的影响^[12-13]。本文通过采用两种时效制度对GH4169合金进行热处理,研究不同时效制度对GH4169合金组织和性能的影响,为组合件制造工序安排提供技术支持。

试验方法

本试验所用试验材料为GH4169热轧棒料。金相试样尺寸为 $\phi 20 \times 10\text{mm}$,力学性能试样则使用尺寸为 $\phi 20 \times 65\text{mm}$ 的棒料。将棒料在 $960 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$,保温1h进行固溶处理,然后分别采用GH4169和GH907合金的时效制度进行处理。GH4169时效制度为 $720 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$,保温8h,然后以 $55 \text{ }^\circ\text{C/h}$ 冷到 $620 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$,保温8h,以下简称为720℃时效制度,GH907时效制度为 $775 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$,保温12h,然后以 $55 \text{ }^\circ\text{C/h}$ 冷到 $620 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$,保温

8h, 以下简称为 775℃ 时效制度。热处理后将 65mm 棒料加工成标准拉伸和高温持久试棒, 再进行组织和力学性能对比试验。力学性能包括 GH4169 合金在室温和 650℃ 下的拉伸强度、塑性和在 650℃ 条件下保温 20min 后进行 690MPa 强度下的高温持久性能。

试棒采用圆棒料在 HLG-75 型空气炉进行热处理, 采用 HB3000 布氏硬度机进行硬度试验, 采用 AG-50、Z100 电子拉力试验机进行室温和高温拉力试验, 采用 XD-100 高温持久蠕变试验机进行持久性能试验, 采用 BX51M 光学相显微镜和 XL-30FEG 扫描电子显微镜进行晶粒度和显微组织观察分析, 采用 D/max2500Pc 型衍射仪 (Cu-Kα 靶) 进行 X 射线衍射测定相组成。

试验结果与讨论

1 时效制度对 GH4169 合金相组成的影响

图 1 为 720℃ 时效制度处理后 GH4169 合金的 X 射线衍射图谱, 图 2 为 775℃ 时效制度处理后 GH4169 合金的 X 射线衍射图谱。

GH4169 合金是一种时效硬化的 Fe-Cr-Ni 基变形高温合金, 由 γ 基体、 γ' 、 γ'' 、 δ 和 NbC 相组成。从图 1 和图 2 的 X 衍射相分析测试结果可以看出, 在 GH4169 合金的 X 射线衍射图中没有独立的 γ' 、 γ'' 相的衍射峰, 不能定量分析 γ' 、 γ'' 相的含量, 但 GH4169 合金无论是经 775℃ 时效还是 720℃ 时效, 相组成一致为 γ 基体、 γ' 、 γ'' 、 δ 和 NbC 相。而 δ 相的衍射强度峰值很小, 从 D/max 2500Pc 型衍射仪定量分析精度可以知道, 尽管经两种时效处理后其 δ 相的含量均少于 5%, 但从放大的衍射峰值可以看出, 经 775℃ 较高温度时效处理后 δ 相含量略有增加。

2 时效制度对 GH4169 合金组织的影响

图 3 为 GH4169 合金经两种时效制度处理后的金相组织照片, 图 4 为 GH4169 合金经两种时效制度处理后的扫描电镜形貌。奥氏体晶粒大小的影响是晶界影响的反映, 因为晶界是位错运动的障碍, 晶粒越小, 晶界越长, 位错运动所需要的应力便越大。从图 3 可以看出, 经过两种时效制度处理的晶粒度均为 10 级以上, 由于 δ 相的析出, 抑制了奥氏体晶粒的长大, 只有在奥氏体完全再结晶后的加热过程中, δ 相发生回溶, 奥氏体晶粒才能发生长大。

如图 4 所示, 经 720℃ 标准时效制度处理后, 少量 δ 相以颗粒状沿晶界析出, 大多呈不连续的短棒状, γ' 、 γ'' 相以细小的圆盘状分布在基体上; 经 775℃ 时效制度处理后, γ' 、 γ'' 相依然在基体上呈均匀分布, 相有长大的趋势, δ 相的析出数量也有所增加, 成不连续短棒状沿着晶界或由晶界长向晶内。同时, 晶内也有少量的颗粒状 δ 相析出。

3 时效制度对 GH4169 合金力学性能的影响

表 1 为时效制度对 GH4169 合

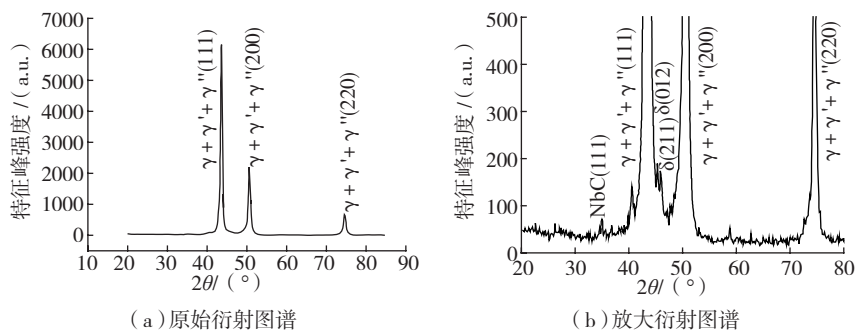


图1 720℃时效制度处理的X射线衍射图谱
Fig.1 XRD spectrum of 720℃ aging treatment

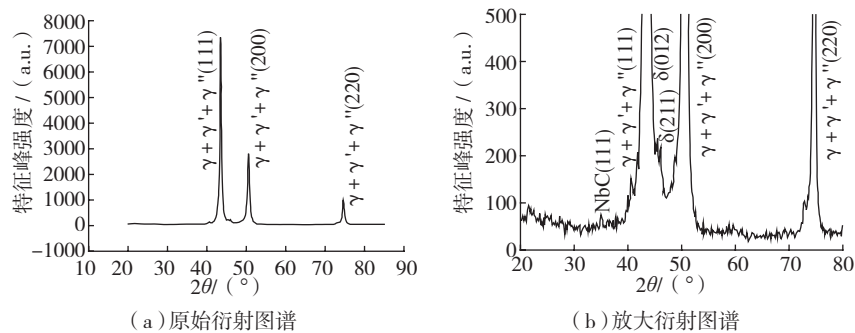


图2 775℃时效制度处理的X射线衍射图谱
Fig.2 XRD spectrum of 775℃ aging treatment

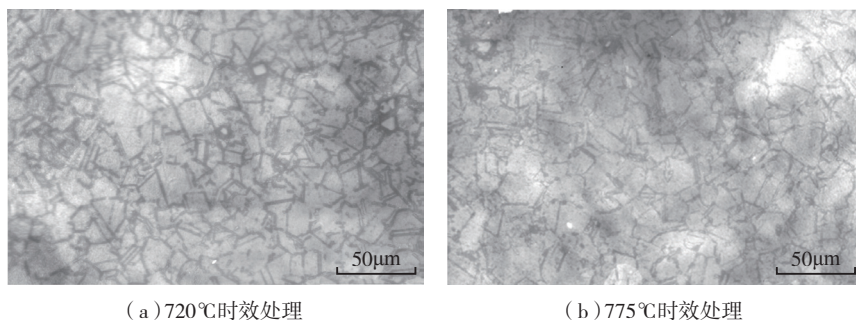


图3 GH4169合金不同时效处理后的金相组织
Fig.3 Microstructures of GH4169 alloy after different aging heat treatment

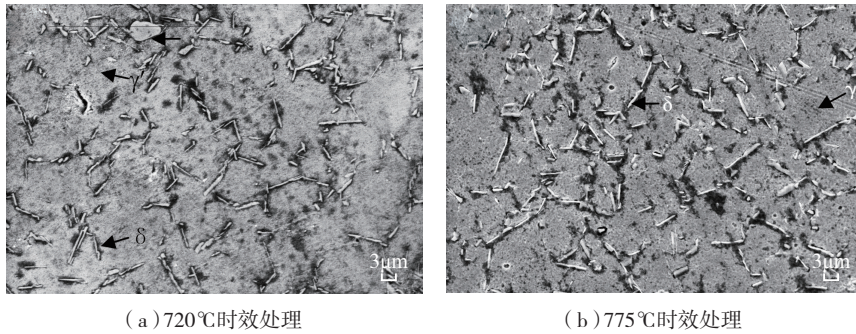


图4 GH4169合金不同时效处理后的扫描电镜照片
Fig.4 SEM images of GH4169 alloy after different aging heat treatment

表1 室温/高温力学性能测试结果

时效温度/℃	测试温度	强度极限 σ /MPa	屈服极限 $\sigma_{0.2}$ /MPa	相对延伸率 δ /%	断面收缩率 ψ /%
720	室温	1450	1240	24	42
		1450	1240	24	42
		1450	1240	24	42
775		1370	1060	24	42
		1370	1060	24	42
		1370	1020	24	42
标准要求		≥ 1280	≥ 1040	≥ 12	≥ 15
720	650℃	1170	985	29	66
		1170	1000	25	64
		1190	1060	22	62
775		1120	925	31	66
		1090	810	28	66
		1080	810	27	66
标准要求		≥ 1000	≥ 860	≥ 12	≥ 18

金室温、高温力学性能的影响,表2为时效制度对GH4169合金光滑、缺口持久性能的影响,表3为时效制度对GH4169合金硬度的影响。从表1中可以看出,经775℃时效制度处理后,室温抗拉强度和屈服强度均有所降低,但延伸率和断面收缩率没有发生变化,650℃条件下的抗拉强度和屈服强度也有所降低,但延伸率和断面收缩率几乎没有发生变化。

从表2可以看出,经775℃时效温度处理的光滑持久性能比经720℃时效温度处理的光滑持久性能有所降低。经两种时效制度处理的缺口持久性能没有大的变化,且均远

大于标准中光滑持久性能的最低要求(23h)。说明这两种时效制度对于GH4169合金均不存在缺口敏感性。

从表3可以看出, GH4169合金经775℃时效处理后的硬度比经720℃时效处理后的硬度低。

GH4169合金经720℃和775℃两种温度时效处理后,其显微组织均为 γ 基体、弥散的 γ' 和 γ'' 相、颗粒或短棒状的 δ 相、少量NbC、TiN组成。 γ'' 相为主要强化相,属体心四方有序结构,析出温度为650~950℃。GH4169合金的强度受 γ'' 相尺寸与数量的影响,随时效温度的升高和时

表2 持久断裂寿命测试结果

时效温度/℃	试验时间/h	
	光滑	缺口
720	262.13	882.82
	313.30	882.82 (未断)
775	83.12	190.88
	151.85	880.20

表3 硬度测试结果 (HB)

时效温度/℃	1	2	3	平均值
720	415	409	415	413
775	370	375	363	369

间的延长, γ'' 相在温度高于700℃时将向 δ 相转化;而且随时效温度的提高, γ'' 相尺寸增加,沉淀强化作用减弱。因此合金在经775℃时效制度处理后,抗拉强度和屈服强度均较低。

δ 相属正交结构,析出温度为700~1000℃,析出峰为900℃。在700~800℃时效时, δ 相在晶界以颗粒状析出,随时效时间的延长, δ 相呈棒状大量析出。 δ 相的析出有助于阻止晶内裂纹的扩展,同时由于 δ 相的析出消耗了基体合金元素Nb,使得析出区的周围出现了 γ' 、 γ'' 相的贫化区,当出现裂纹时裂纹尖端产生的应力集中在 γ' 、 γ'' 相贫化区释放,这样可以提高合金的缺口持久性能。但析出过量的 δ 相会消耗较多的Nb,对析出 γ'' 相不利,因此,必须使 γ'' 相和 δ 相合理匹配,以获得良好的综合性能。从表1至表2的性能数据可以反映出,时效温度在720℃提高到775℃时,抗拉强度和屈服强度有所降低,光滑持久和缺口持久性能基本没有变化,均不存在缺口敏感。

结论

(1)与GH4169时效处理相比,775℃时效处理使GH4169合金的 δ 相的析出量有所增加, γ' 、 γ'' 相略有

长大,但合金的晶粒度没有发生变化,均为10级以上。

(2) 使用775℃时效制度处理GH4169合金,力学性能有所降低,但不影响GH4169合金的缺口敏感,且力学性能均满足标准要求。

参考文献

[1] 杜金辉, 吕旭东, 邓群, 等. GH4169合金研制进展[J]. 中国材料进展, 2012,31(12):12-15.

DU Jinhui, LÜ Xudong, DENG Qun, et al. Progress in GH4169 alloy development[J]. Materials China, 2012,31(12):12-15.

[2] 张尊礼, 史凤岭, 张凡云, 等. 热处理制度对GH4169冷轧叶片组织性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2013,21(4):26-31.

ZHANG Zunli, SHI Fengling, ZHANG Fanyun, et al. Effects of heat treatment on structure and mechanical properties of GH4169 cold rolling blade[J]. Materials Science and Technology, 2013,21(4):26-31.

[3] 田世藩, 张国庆, 李周, 等. 先进航空发动机涡轮盘合金及涡轮盘制造[J]. 航空材料学报, 2003,23(S):233-238.

TIAN Shifan, ZHANG Guoqing, LI Zhou, et al. The disk superalloys and disk manufacturing technologies for advanced aero engine[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003,23(S):233-238.

[4] SUNDARARAMAN M, MUKHOPADHYAY P, BANERJEE S. Some aspects of the precipitation of metastable intermetallic phases in Inconel 718[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1992,23:2015-2028.

[5] AZADIAN S, LIU Y W, WARREN R. Delta phase precipitation in Inconel 718[J]. Materials Characterization, 2004,53:7-16.

[6] KUO C M, YANG Y T, BOR H Y, et al. Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2009,510-511:289-294.

[7] 杨玉荣, 梁学锋, 蔡伯成, 等. δ 相对GH4169合金高温持久性能的影响[J]. 航空材料学报, 1996,16(2):38-39.

YANG Yurong, LIANG Xuefeng, CAI Bocheng, et al. Effects of δ phase on stress-rupture properties of GH4169 alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1996,16(2):38-39.

[8] 蔡大勇, 张伟红, 刘文昌, 等. Inconel718合金中 δ 相溶解动力学及对缺口敏感性的影响[J]. 有色金属, 2003,55(1):3-5.

CAI Dayong, ZHANG Weihong, LIU Wenchang, et al. Dissolution kinetics of δ phase and effect on notch sensitivity of Inconel 718[J]. Nonferrous Metals, 2003,55(1):3-5.

[9] DU J H, LÜ X D, DENG Q. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of GH4169 superalloy[J]. Rare Metal

Materials and Engineering, 2014,43(8):1830-1834.

[10] YE H A C, LU K W, KUO C M, et al. Effect of serrated grain boundaries on the creep property of Inconel 718 superalloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2011,530:525-529.

[11] 孔永华, 李胡燕, 陈国胜, 等. 热处理工艺对GH4169合金蠕变性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2014,42(1):52-56.

KONG Yonghua, LI Huyan, CHEN Guosheng, et al. Effects of different heat treatment on creeping property of GH4169 alloy[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2014,42(1):52-56.

[12] 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):472-474.

KONG Yonghua, LI Long, CHEN Guosheng, et al. Effect of different heat treatments on microstructures and properties of GH4169 alloy[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2010,39(S1):472-474.

[13] 王岩, 林琳, 邵文柱, 等. 固溶处理对GH4169合金组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2007,28(S):176-178.

WANG Yan, LIN Lin, SHAO Wenzhu, et al. Effect of solid-solution treatment on microstructure and performance of GH4169 superalloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(S):176-178.

Effects of Aging Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of GH4169 Alloy

NIU Jing¹, ZHANG Fanyun¹, YANG Shulin², WANG Man¹, ZHAO Zhi¹, LIU Jing¹

(1. Technical Center, AECC Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Cooperation, Shenyang 110044, China;

2. Military Representative Office, AECC Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Cooperation, Shenyang 110044, China)

[ABSTRACT] The microstructure and mechanical properties of GH4169 alloy are tested and analyzed following respective aging treatments of GH907 and GH4169, to gain an insight into the effect of GH907 alloy aging treatment on GH4169 alloy. The results show that δ phases of GH4169 alloy during aging treatment at 775℃ increased in quantity, the γ' and γ'' phases grow slightly, but the crystal grain size do not change evidently as compared to those of GH4169 subjected to aging treatment at 720℃. The notched stress rupture life of the GH4169 alloy do not change significantly and is not notch sensitive following aging treatment at 775℃, however, the yield strength and ultimate strength at room-temperature and 650℃, stress rupture life and hardness moderately diminished.

Keywords: GH4169 alloy; Aging treatment; Mechanical property

(责任编辑 李丹)