

• 试验研究 Experimental Research •
DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2025.5105

固溶温度对 GH4169 高温合金微观结构与力学性能影响

刘 伟¹, 李 科¹, 赵燕茹¹, 朱 静¹, 孟庆坤², 马瑞亭¹

(1. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018 2. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221116)

摘 要: GH4169 是一种广泛应用于航空、核电等重要领域的高温合金, 除控制锻造工艺外, 通过热处理调整合金微观结构和组织稳定性也是提高其力学性能的重要方式。利用光镜(OM)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)及拉伸试验等方法, 研究了 GH4169 合金经 960~1 020 °C 固溶处理后时效的显微组织演变及室温、650 °C 拉伸性能的变化规律。结果表明, 固溶温度显著影响了合金微观结构, 当固溶温度升高到 1 000 °C 后, 合金中 δ 相大量溶解, 导致基体晶粒尺寸迅速长大; 由于基体中溶质元素的增加, 在随后的时效处理中 γ' 和 γ'' 析出量增加。晶粒尺寸增加对力学性能的降低作用超过了增强相含量增加带来的强化作用, 相对于 960 和 980 °C 固溶后时效的试样, 1 000 和 1 020 °C 固溶时效的试样在室温和 650 °C 的屈服强度都更低。

关键词: 高温合金; 固溶温度; 力学性能; 析出相; 固溶时效

中图分类号: TG132.3+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)08-0809-07

Effects of Solution Treatment Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of GH4169 Superalloy

LIU Wei¹, LI Ke¹, ZHAO Yanru¹, ZHU Jing¹, MENG Qingkun², MA Ruiting¹

(1. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 2. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: GH4169 is a superalloy widely used in important fields, such as aviation and nuclear power. In addition to controlling the forging process, modifying the microstructure and enhancing the stability of the alloy via heat treatment is also an important way to improve its mechanical properties. Optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and tensile tests were used to study the changes in the microstructure and tensile properties of the GH4169 alloy after solution treatment at 960~1 020 °C followed by aging at room temperature and 650 °C. The results show that the solution temperature significantly affects the microstructure of the alloy. When the solution temperature increases from 960 to 1 000 °C, a large amount of the δ phase in the alloy dissolves, resulting in rapid growth of the matrix grain size. Owing to the increase in solute elements in the matrix, the amounts of γ' and γ'' precipitates increase during the subsequent aging treatment. The reduction effect resulting from the increase in the grain size on the mechanical properties exceeds the strengthening effect caused by the increase in the number of strengthening phases. Compared with the alloys aged after solution treatment at 960 and 980 °C, those subjected to solution treatment at 1 000 and 1 020 °C prior to aging present reduced yield strengths at both room temperature and 650 °C.

Key words: superalloy; solution temperature; mechanical properties; precipitated phase; solid solution and aging

GH4169 合金是一种 Fe-Ni-Cr 基沉淀硬化型高温合金, 在 -253~650 °C 范围内展现出优异的强度和韧性, 尤其在 650 °C 以下兼具良好的抗氧化性与耐

腐蚀性。凭借其优异的性能, 该合金被广泛应用于航空发动机的涡轮叶片、燃烧室组件、喷气推进器等高温部件的制造^[1-2]。GH4169 合金作为变形高温合金,

收稿日期: 2025-06-09

作者简介: 刘 伟, 1986 年生, 硕士, 工程师。主要从事高温合金研究工作。Email: 964135909@qq.com

通信作者: 李 科, 1996 年生, 硕士, 工程师。主要从事高温合金、钛合金研究工作。Email: 15754303726@163.com

引用格式: 刘伟, 李科, 赵燕茹, 朱静, 孟庆坤, 马瑞亭. 固溶温度对 GH4169 高温合金微观结构与力学性能影响[J]. 铸造技术, 2025, 46(8): 809-815.

LIU W, LI K, ZHAO Y R, ZHU J, MENG Q K, MA R T. Effects of solution treatment temperature on the microstructure and mechanical properties of GH4169 superalloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(8): 809-815.

主要强化机制为析出强化。其组织主要由 γ 基体、 γ' 相、 γ'' 相、 δ 相及碳化物组成, 其中 γ'' 相为主要强化相, 这是由于基体与 γ'' 相间存在较大点阵错配度 (2.86%), 可产生显著共格应力, 从而发挥明显强化作用^[3-4]。 γ'' 相在 GH4169 合金中属于亚稳相, 热力学上并不稳定。在长期时效过程中, 其有向平衡相 δ 相转变的趋势^[5]。 δ 相的形核通常发生在 γ'' 层错上。随时效时间延长, 合金中大量 γ'' 相逐渐转变为 δ 相。 δ 相呈较粗大形态, 且与基体不共格, 主要沿晶界析出并对晶界起钉扎作用, 导致材料拉伸性能下降、持久性能逐渐弱化^[6]。此外, 随着长时间的时效处理, 合金析出相也会粗化。热加工和热处理是调控合金中析出相的重要手段, 针对不同的使用条件, 采用不同热处理对显微组织进行调控。常用的热处理制度通常包括固溶和双级时效两部分, 主要有高强、标准热处理和直接时效 3 种^[7]。

GH4169 的相变与温度密切相关, 热处理温度不仅影响合金的相组成和微观结构, 还会直接影响其力学性能, 如抗拉强度、屈服强度、延展性和疲劳性能等。咎斌等^[8]研究了不同热处理温度对 GH4169 合金组织及硬度的影响, 发现固溶温度为 900~1 000 °C 时, 合金微观组织无明显变化, 硬度随固溶温度升高略有下降, 1 050 °C 以上固溶时, 再结晶晶粒会随着固溶温度升高而迅速长大, 硬度也显著下降。Jouiad 等^[9]发现 650 °C 时效后, 高温拉伸性能和硬度无明显变化。然而, 在时效温度 700 °C 及以上, 两种力学性能都在持续下降。这种力学性能退化归因于 700 °C 及以上的 γ'' 溶解和 γ'' 向 δ 的转变, 以及 800 °C 以上过时效导致的 γ' 相溶解。李振荣等^[10]采用透射电子镜 (TEM) 对时效处理热连轧 GH4169 合金的组织形貌进行观察, 经过直接时效和长期时效后, 合金中 γ 相体积分数基本保持不变, γ' 相体积分数逐渐减小, 而 γ'' 相的体积分数逐渐增加。Maj 等^[11]的研究发现, γ'' 相在 650~750 °C 温度范围内呈基本均匀成核特征, 使强度达到最大增幅。在长时间的时效过程中, γ'' 会发生长大甚至发生转变, 这会在极大程度上影响性能。崔文明等^[12]研究了不同温度高温时效处理下 GH4169 合金中 γ'' 相、 δ 相的变化对 GH4169 合金的力学性能的影响。固溶处理是提高

GH4169 合金性能的关键步骤之一, 其温度对合金微观组织和相变行为有着显著影响。较高的固溶温度可能导致合金中强化相的过度溶解和晶粒过度长大, 从而不利于合金的力学性能。当温度过低时, 无法充分固溶合金元素和调控锻态组织, 影响时效处理中的强化相析出^[13]。明确固溶温度对 GH4169 合金微观组织和力学性能的影响规律, 对于合金热处理工艺的制定具有重要参考价值。

本研究旨在系统探讨不同固溶温度对 GH4169 高温合金的微观结构及其力学性能的影响, 通过对合金在不同固溶处理温度下的组织特征、相组成以及力学性能的分析, 揭示固溶温度与合金性能之间的关系, 为 GH4169 高温合金的工程应用和材料优化提供理论依据和实验支持。

1 实验材料与方法

从 $\phi 300$ mm 的 GH4169 快锻棒材上切取厚度为 30 mm 的试样片, 化学成分如表 1 所示, 初始状态为锻态 (R 态)。合金分别在 960~1 020 °C 范围内固溶, 保温时间均为 1 h, 空冷; 随后进行时效处理, 时效制度为 720 °C 保温 8 h, 炉冷至 620 °C 保温 8 h, 空冷; 下文中试样命名时, 以 ST 代表固溶状态, STA 代表固溶时效状态。借助蔡司倒置光学显微镜 AXIO VERT.A1 光镜 (OM)、日本电子 JSM-IT700HR 扫描电镜 (SEM)、Titan G2 60-300 FEI 透射电镜表征合金显微组织, ZwickRoell Z100 试验机测试其室温及 650 °C 拉伸性能。

为避免棒材心部到边部组织差异的影响, 拉伸试样均在试样片 0.5R 位置沿弦向取圆棒形拉伸试样坯, 规格为 $\phi 13$ mm $\times$ 75 mm, 经热处理后加工成符合 GB/T 228.1 的 $\phi 5$ mm 圆形标准拉伸试样。透射电镜样品制备过程为: 从热处理的拉伸试样坯端部去除 1 mm 后, 切取 0.3 mm 厚的薄片; 经机械减薄后, 进一步切割为 $\phi 3$ mm 圆形薄片。采用体积分数 10% HClO₄ 与 90% C₂H₅OH 的混合液作为电解液, 在 -25 °C、20 V 电压下进行双喷电解减薄; 减薄完成后, 经清洗、干燥即完成样品制备。显微组织观察样品取自拉伸试验后的非变形螺纹区, 经镶嵌、磨抛后, 采用 20 mL HCl+20 mL C₂H₅OH+1 g CuCl₂ 溶液腐蚀

表1 GH4169合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of GH4169 alloy

(mass fraction/%)									
Element	C	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	Ni	Fe	Si
Content	0.021	17.94	3.04	5.46	1.02	0.53	53.94	Bal.	0.028
Element	Ta	Co	Mn	S	P	Mg	B	Cu	
Content	<0.010	0.20	<0.005	0.000 5	0.012	0.000 5	0.003 9	0.002 9	

以显示合金显微组织。

2 实验结果及讨论

2.1 固溶温度对GH4169合金微观结构的影响

图1为GH4169合金锻态和960℃固溶1h后(960ST)的OM照片。从图1a可以看出锻态合金组织为等轴组织,平均晶粒尺寸约23 μm,颗粒状碳化物和细小的δ相分布在晶粒中和晶界处,这是因为终锻温度较低,变形过程中δ相未完全溶解,δ相分布沿棒材纵向存在一定的取向特征,且大规格棒材在结束锻造后冷却较慢,在空冷过程中温度达到δ相的析出温度,组织中的大量缺陷也会促进δ相析出^[14]。δ相和碳化物在低倍下较难分辨,故使用扫描电镜放大观察,可以看出碳化物通常呈块状(图1c),而δ相呈颗粒状或短棒状(图1d),且碳化物的尺寸显著大于δ相。图1b为锻态合金经过960℃/1h固溶处理,合金的组织变化不明显,但晶界衬度较R态明显降低,这种差异主要是固溶处理提高了合金的耐蚀性,同时晶粒形态的变化可能源于样品的区域变化。

图2给出了GH4169合金在不同温度固溶后进行时效处理的SEM照片。960STA态试样与960ST类似(图1d),其γ基体呈等轴态,平均晶粒尺寸约25 μm,基体弥散分布着细小δ相。980STA和960STA试样的显微组织基本一致,均由γ相基体和δ相组成,晶粒度大小基本一致。进一步升高固溶温度后,晶粒明显长大,1000STA和1020STA试样晶粒尺寸

长大50~60 μm,而且δ相含量明显降低。文献研究表明,δ相于980℃开始溶解,当固溶温度超过δ溶解温度时,固溶中δ相出现溶解^[15]。δ相起到钉扎晶界的作用,可有效抑制固溶过程中合金晶粒的长大^[16]。因此,在较低固溶温度下,由于δ相的存在,合金保持细小的晶粒尺寸;当固溶温度升高到1000℃时,δ相大量溶解,晶粒迅速长大^[17]。

为进一步观察固溶时效过程中合金析出相的变化,采用TEM表征合金在热处理过程中的微观组织演变。图3为锻态和固溶态合金的TEM照片及选区电子衍射斑点。图3a为合金锻态TEM暗场像,图3b为沿γ相[011]晶带轴的衍射斑点。可以看出,除基体相衍射斑点外,还存在γ'超点阵衍射斑点,由图3b选取(100)的衍射斑点得到暗场像,两者结合可确定图3a中长条状析出相即为γ'相^[18]。如图3c所示,明场相未观察到任何第二相,图3d中,固溶处理后试样的选区电子衍射斑点中仅发现基体FCC结构γ相的衍射斑点,合金中不存在γ'、γ''相,说明固溶处理过程中强化相已完全溶入基体中。由于γ'的析出温度为593~816℃,γ''的析出温度为595~870℃^[19],固溶处理冷却速度较快抑制了γ'和γ''相的析出。

图4为在不同温度固溶后进行时效试样的TEM选区电子衍射斑点和对应的暗场像。从图4b中960STA试样的[011]_γ带轴的电子衍射斑点可以看出,基体γ中分布的析出相为γ'和γ''相。980STA和960STA的类似,同样有γ'、γ''相的析出。利用

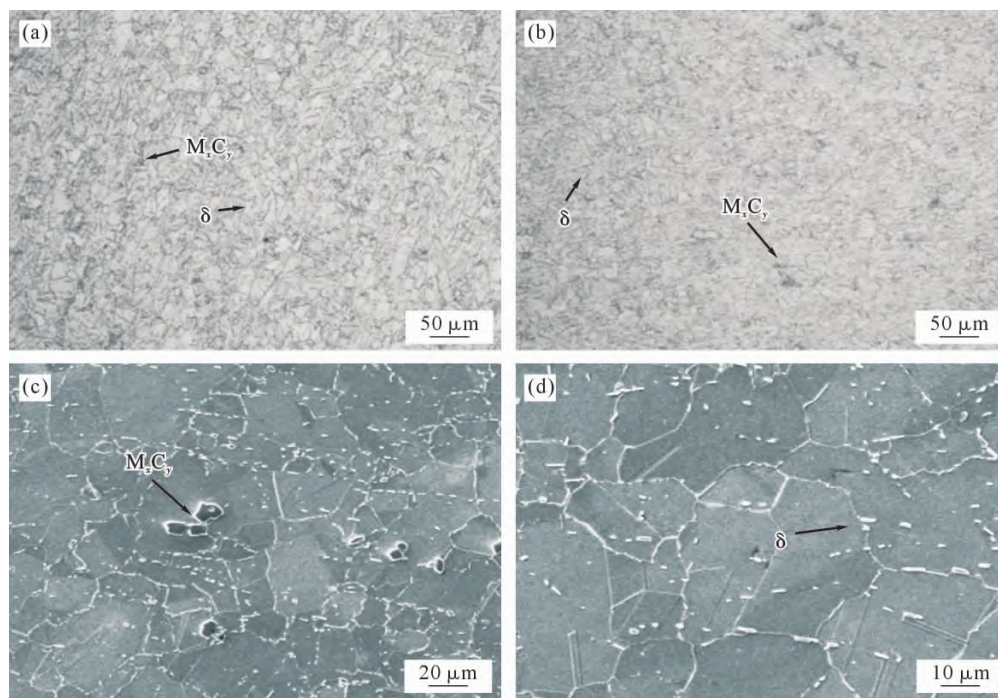


图1 锻态和960℃固溶态GH4169合金显微组织:(a,c,d)锻态;(b)固溶态

Fig.1 Microstructures of as-forged and solution-treated GH4169 alloys: (a, c, d) as-forged; (b) solution-treated

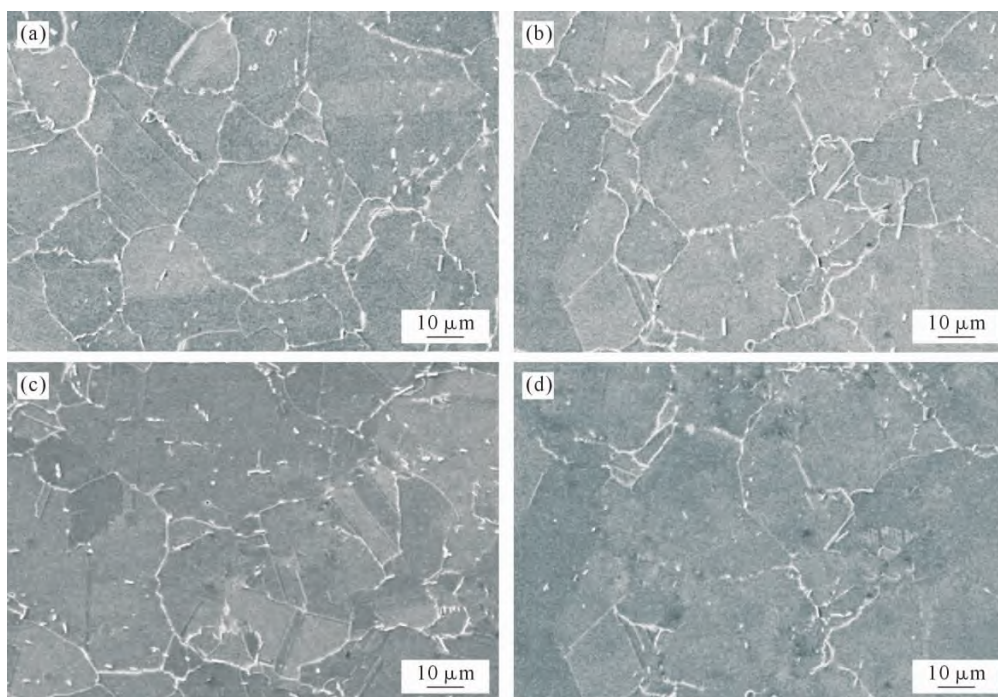


图2 经不同温度固溶后时效处理合金的 SEM 像:(a) 960 °C; (b) 980 °C; (c) 1 000 °C; (d) 1 020 °C
Fig.2 SEM images of aging treated alloy after solution treatment at different temperatures: (a) 960 °C; (b) 980 °C; (c) 1 000 °C; (d) 1 020 °C

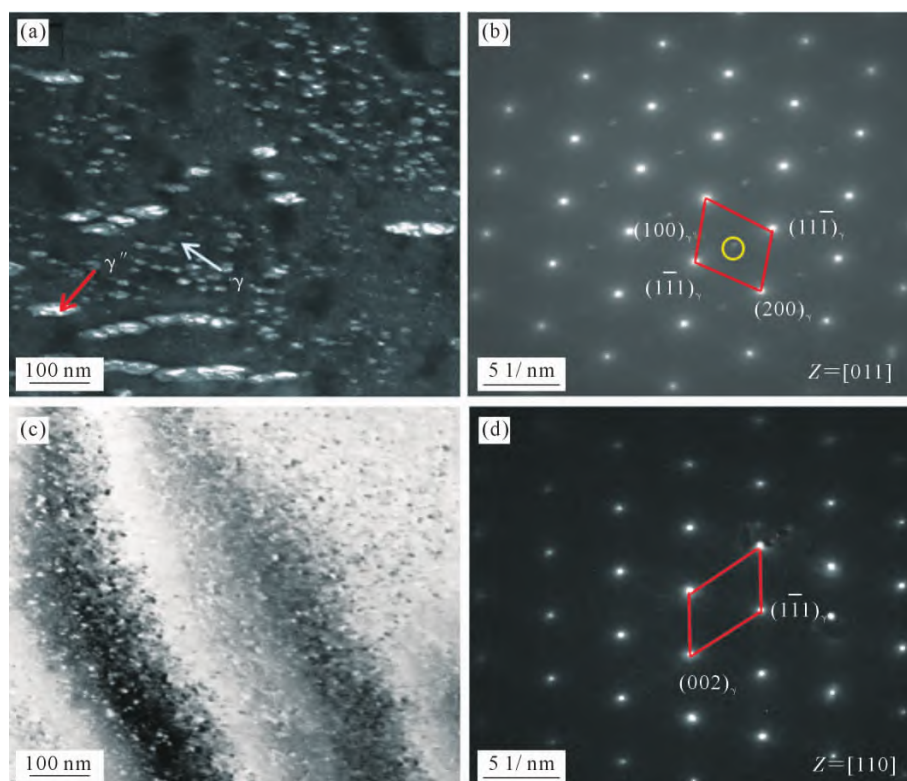


图3 锻态及 960ST 态合金的 TEM 像:(a, b) 锻态合金暗场像及 SAED 斑点;(c, d) 960ST 态合金明场像及 SAED 斑点
Fig.3 TEM images of the as-forged and 960ST state alloys: (a, b) dark-field image and SAED patterns of the as-forged alloy; (c, d) bright-field image and SAED patterns of the 960ST state alloy

960STA 和 980STA 试样的(100)晶面衍射斑点做暗场像分析(图 4a 和 c),可以看出 γ' 、 γ'' 弥散分布于基体中, γ'' 相体积较大,呈椭圆状, γ' 相呈细小较暗的点状,但在这两个固溶温度下 γ' 、 γ'' 相析出量相对较少。图 4f 为 1000STA 试样 $[001]_{\gamma}$ 晶带轴的衍射斑,

γ 相衍射斑点中较弱的衍射斑点为 γ'' 和 γ' 重合的超晶格衍射,表明在 γ 相中析出了 γ'' 和 γ' 相。从对应的暗场像中可以观察到 γ'' 和 γ' 析出相的形貌。图 4h 为 1020STA 试样 $[001]_{\gamma}$ 晶带轴衍射斑,结果与 1000STA 相似。相对于 960STA 和 980STA 试样,可

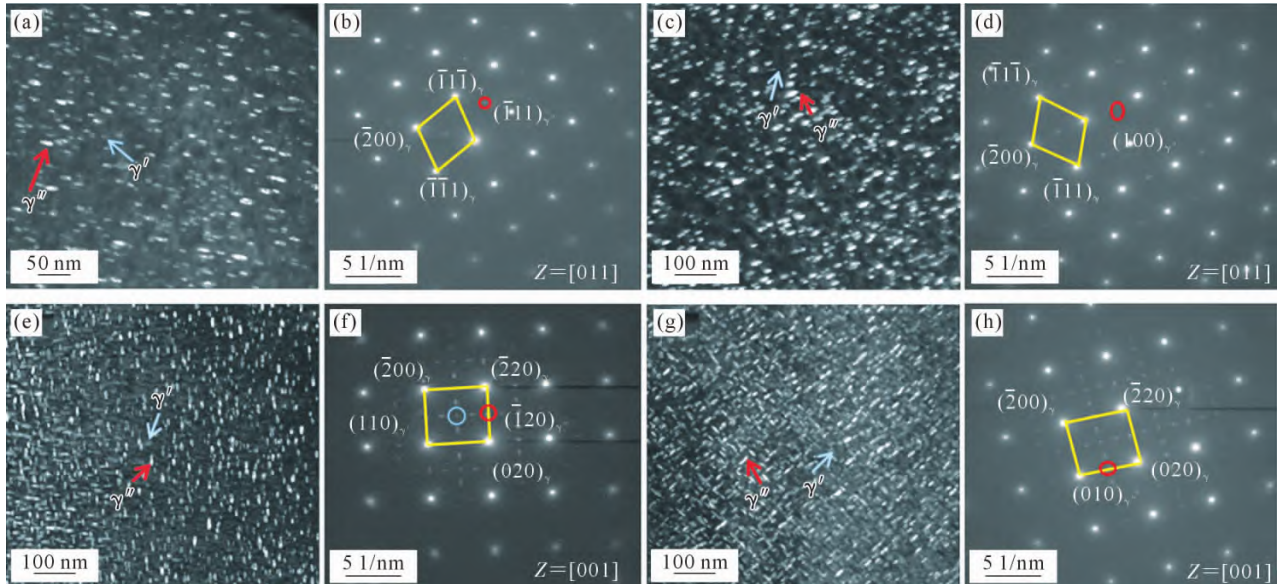


图4 不同固溶温度下固溶时效合金暗场像和SAED斑点:(a, b) 960 °C; (c, d) 980 °C; (e, f) 1 000 °C; (g, h) 1 020 °C
Fig.4 Dark-field images and SAED spots of solution-aged alloys at different solution temperatures: (a, b) 960 °C; (c, d) 980 °C; (e, f) 1 000 °C; (g, h) 1 020 °C

以发现 1000STA 和 1020STA 试样 γ'' 相数量明显增多,且更为细小、分布更加均匀。当固溶温度升高到 1 000 °C 以上后,合金中 δ 相大量溶解量,基体中合金元素增多,这有利于时效中 γ'' 增强相的析出^[20]。

2.2 固溶温度对 GH4169 合金室温和高温力学性能的影响

为探究固溶温度对合金力学性能的影响,分别在室温和 650 °C 下对锻态合金和不同温度固溶时效合金进行了单轴拉伸试验。图 5 给出了室温下不同热处理态合金的应力-应变曲线和对应的屈服强度(YS)、抗拉强度(UTS)和伸长率(EL)。从图 5a 可以看出锻态合金具有最低的强度和最好的塑性,固溶态以及固溶时效态合金的抗拉强度类似。从图 5b 可以看出 960ST 合金抗拉强度最高而塑性最差,随固溶温度的提高,固溶时效态合金抗拉强度变化不明显,而塑性有一定升高。960STA 和 980STA 合金的屈服强度与 960ST 类似,然而 1000STA 和 1020STA 的屈服强度明显偏低。室温下合金的抗拉强度主要

源于固溶强化,而屈服强度与晶粒细化密切相关。由于整个时效过程中析出相的体积分数比较小,基体中的溶质含量变化不大,固溶态与不同温度的固溶时效态合金的抗拉强度差别较小。另一方面,基体晶粒在 1 000 °C 以上固溶后明显长大,降低了合金的屈服强度。

不同热处理态 GH4169 合金在 650 °C 下拉伸的力学性能如图 6 所示。从图 6a 的拉伸曲线可以看出 1000STA 和 1020STA 合金具有最低的屈服强度和最好的塑性。由于固溶温度较高,这两种合金具有更大的晶粒尺寸,导致其屈服强度更低。图 6b 总结了不同热处理态的抗拉强度、屈服强度和伸长率的变化趋势,可以看出, R 态、960ST、960STA 和 980STA 的抗拉强度和屈服强度基本一致,且除 R 态外,其余 3 种的伸长率基本一致。进一步升高固溶温度,1000STA 和 1020STA 合金的抗拉强度和屈服强度都明显低于 980STA 的。过高的固溶温度一方面导致晶粒过度长大,不利于合金的强度,另一方面高固溶温度可

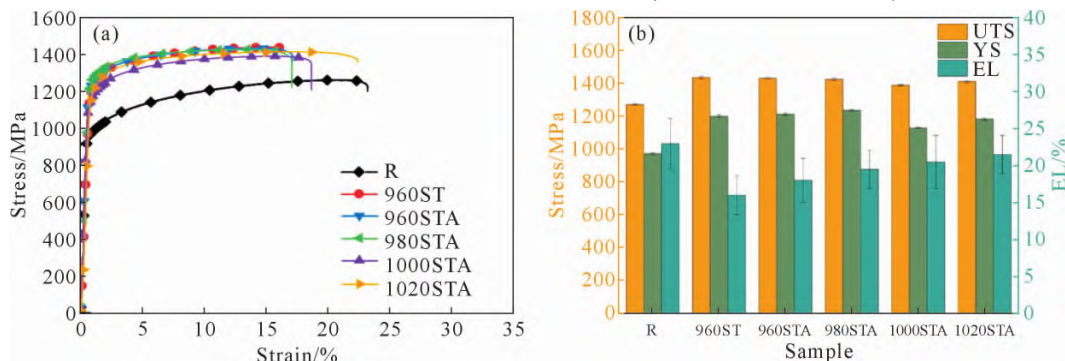


图5 室温下不同热处理态合金拉伸性能:(a) 应力-应变曲线;(b) 抗拉强度、屈服强度及伸长率
Fig.5 Tensile properties of alloys in different heat-treated states at room temperature: (a) stress-strain curves; (b) tensile strength, yield strength and elongation

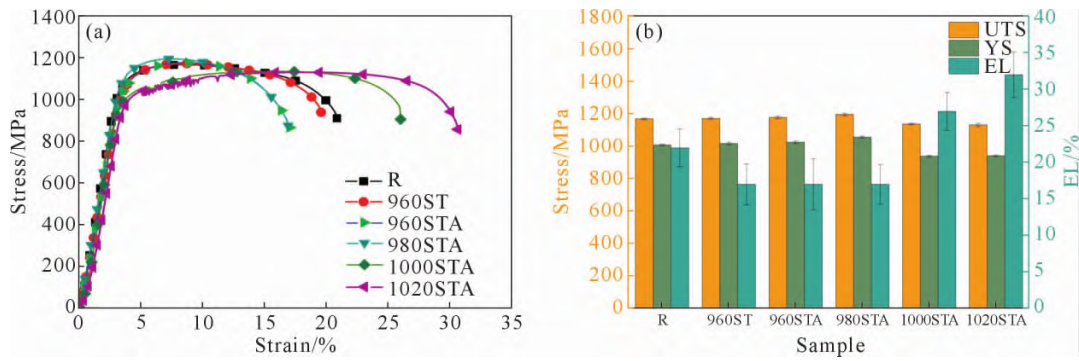


图 6 650 °C 下不同热处理态合金拉伸性能:(a) 应力-应变曲线;(b) 抗拉强度、屈服强度及伸长率
Fig.6 Tensile properties of alloys in different heat-treated states at 650 °C: (a) stress-strain curves; (b) tensile strength, yield strength and elongation

以增加强化相 γ' 和 γ'' 的析出,这有利于合金的高温强度。高温拉伸试验结果表明晶粒过度长大占据了主导作用,导致了合金强度的下降。一般 GH4169 的标准使用要求为:室温抗拉强度不低于 1 230 MPa,屈服强度不低于 1 020 MPa;650 °C 抗拉强度不低于 900 MPa,屈服强度不低于 800 MPa。基于此文的研究结果建议 GH4169 合金的固溶温度不超过 1 000 °C。

3 结论

(1) 锻态、固溶时效态合金由 γ 、 γ' 、 γ'' 、 δ 和碳化物组成,而固溶态合金不含 γ' 和 γ'' ;当固溶温度低于 1 000 °C 时,合金晶粒尺寸和 δ 含量变化较小;当固溶温度升高到 1 000 °C 后, δ 相大量溶解,基体晶粒尺寸迅速长大,由于基体中溶质元素的增加,在随后的时效处理中 γ' 和 γ'' 析出量增加。

(2) 随固溶温度的提高,室温抗拉强度基本不变而伸长率增加,当固溶温度低于 1 000 °C 时,时效态合金(960STA 和 980STA)屈服强度相似,更高固溶温度合金(1000STA 和 1020STA)的屈服强度明显降低;与室温拉伸性能类似,固溶温度达到 1 000 °C,其 650 °C 的屈服强度明显降低。基于微观结构和室温高温的力学性能数据,推荐 GH4169 的固溶温度不应超过 1 000 °C。

参考文献:

- [1] 高健,刘奋成,李春雨,刘丰刚,黄春平. 扫描方式对 GH4169 合金电子束熔丝增材修复组织与性能的影响[J]. 稀有金属,2023, 47(5): 725-737.
GAO J, LIU F C, LI C Y, LIU F G, HUANG C P. Microstructure and mechanical properties of wire fusion electron beam repairing of GH4169 superalloy with different scanning models [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47(5): 725-737.
- [2] 高圣勇,王一雯,苏孺,吴大勇,康杰,包燕平. GH4169 高温合金低周疲劳变形行为研究[J]. 稀有金属,2022, 46(3): 289-296.
GAO S Y, WANG Y W, SU R, WU D Y, KANG J, BAO Y P.

- Low-cycle fatigue behavior of GH4169 superalloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46(3): 289-296.
- [3] SOHRABI M J, MIRZADEH H. Unexpected formation of delta (δ) phase in as-cast niobium-bearing superalloy at solution annealing temperatures[J]. Materials Letters, 2020, 261: 127008.
- [4] YANG X W, MENG T X, SU Y, XU R, GUO Z G, XU Y X, MA T J, LI W Y. Effect of initial microstructure on performance and corrosion behavior of GH4169 superalloy joint produced by linear friction welding[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2025, 38(3): 103226.
- [5] 张颖琳,霍玉鑫,杨永亮,张嘉祥. GH4169 高温合金喷丸残余应力有限元分析[J]. 北华航天工业学院学报,2024, 34(4): 15-18.
ZHANG Y L, HUO Y X, YANG Y L, ZHANG J X. Finite element analysis of residual stress in shot peening of GH4169 superalloy [J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2024, 34(4): 15-18.
- [6] 于荣莉,徐晓,王春生. GH4169 合金组织结构对性能的影响[J]. 航空制造工程,1998(2): 25-28.
- [7] 郑泽邦,旷野,赵盼娣,宋晓悦. 拉伸变形和热处理对 GH4169 镍基高温合金应变率敏感性的影响[J]. 锻压技术,2024, 49(7): 48-56.
ZHENG Z B, KUANG Y, ZHAO P D, SONG X Y. Effect of tensile deformation and heat treatment on strain rate sensitivity of nickel-based superalloy GH4169[J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49(7): 48-56.
- [8] 曾斌,王奇,徐宁,王旭,吴大莉. 热处理对 GH4169 合金组织及硬度的影响[J]. 金属热处理,2023, 48(7): 193-197.
ZAN B, WANG Q, XU N, WANG X, WU D L. Effect of heat treatment on microstructure and hardness of GH4169 alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(7): 193-197.
- [9] JOUIAD M, MARIN E, DEVARAPALLI R S, CORMIER J, RAVAUX F, LE GALL C, FRANCHET J M. Microstructure and mechanical properties evolutions of alloy 718 during isothermal and thermal cycling over-aging[J]. Materials & Design, 2016, 102: 284-296.
- [10] 李振荣,马春蕾,田素贵,陈礼清,刘相华. 时效处理对热连轧 GH4169 合金组织及晶格常数的影响[J]. 稀有金属,2014, 38(5): 786-792.
LI Z R, MA C L, TIAN S G, CHEN L Q, LIU X H. Microstructure and lattice parameters of hot continuous rolling GH4169 alloy by different aging treatment[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014,

- 38(5): 786-792.
- [11] MAJ P, ADAMCZYK-CIELAK B, SLESIK M, MIZERA J, PIEJA T, SIENIAWSKI J, GANCARCZYK T, DUDEK S. The precipitation processes and mechanical properties of aged Inconel 718 alloy after annealing[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2017, 62(3): 1695-1702.
- [12] 崔文明,王纪兴,邹佳佳,张晓辰,张凯,梁锡炳,张瑞,臧昊良. GH4169合金经高温及应力时效处理后的组织演变及性能[J]. 金属热处理, 2023, 48(12): 194-200.
- CUI W M, WANG J X, ZOU J J, ZHANG X C, ZHANG K, LIANG X B, ZHANG R, ZANG H L. Microstructure evolution and properties of GH4169 alloy after high temperature and stress aging treatment[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(12): 194-200.
- [13] 王绍灼,李燕,杨萍. 返回料及热处理对GH4169棒材的组织性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(8): 1137-1140.
- WANG S Z, LI Y, YANG P. Effects of reverts and heat treatment on microstructure and properties of GH4169 alloy bars[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8): 1137-1140.
- [14] 田淞文,王欣,刘丽荣,田素贵. 长期时效对一种GH4169合金蠕变行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(11): 77-84.
- TIAN S W, WANG X, LIU L R, TIAN S G. Influence of long-term aging on creep behavior of a GH4169 alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(11): 77-84.
- [15] 孔永华,李龙,陈国胜,朱世根. 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.
- KONG Y H, LI L, CHEN G S, ZHU S G. Effect of different heat treatments on microstructures and properties of GH4169 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(S1): 472-475.
- [16] ZHANG H J, LI C, LIU Y C, GUO Q Y, LI H J. Precipitation behavior during high-temperature isothermal compressive deformation of Inconel 718 alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 677: 515-521.
- [17] ZHANG H J, LI C, GUO Q Y, MA Z Q, HUANG Y, LI H J, LIU Y C. Hot tensile behavior of cold-rolled Inconel 718 alloy at 650 °C: The role of δ phase[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 722: 136-146.
- [18] HE F, CHEN D, HAN B, WU Q F, WANG Z J, WEI S L, WEI D X, WANG J C, LIU C T, KAI J J. Design of D0₃₂ superlattice with superior strengthening effect in high entropy alloys[J]. Acta Materialia, 2019, 167: 275-286.
- [19] CHAMANFAR A, SARRAT L, JAHAZI M, ASADI M, WECK A, KOUL A K. Microstructural characteristics of forged and heat treated Inconel-718 disks [J]. Materials & Design, 2013, 52: 791-800.
- [20] CALVIN SAMUEL S, PRABHU T R, MOGANRAJ A, SAMUEL M S, PRAVEENKUMAR K, BOBBY S S, PRAKASAM A. Effect of heat treatment on microstructure and high-temperature wear performance of additive manufactured IN718[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 127: 683-697.
- (责任编辑:杨浩雪)