热处理工艺对深海油气开采用 UNS N07718 高温 合金性能及微观组织的影响

刘恒^{1a},罗锐^{1a},钱喜根²,孙希²,赵钦兰²,崔力云²,杨程^{1a*},丁恒楠^{1b}

(1.江苏大学 a.材料科学与工程学院 b.农业工程学院,江苏 镇江 212013; 2.江苏孚杰高端 装备制造(集团)股份有限公司,江苏 苏州 215233)

摘要:目的研究经过不同热处理后深海油气开采用 UNS N07718 的显微组织和室温、低温力学性能变化, 获得适合工业生产的最佳热处理参数。**方法** 根据石油行业 API 6ACRA 规范要求,采用不同固溶热处理参 数来对比 UNS N07718 高温合金显微组织变化,再经过不同的时效热处理工艺,通过室温拉伸试验、硬度试 验和低温冲击试验来对比综合热处理对材料力学性能的影响。结果 1 040 ℃固溶温度的晶粒尺寸明显大于 1 025 ℃的晶粒尺寸,这主要是由于δ析出相的完全回溶,降低了对晶界的钉扎作用,导致晶粒急剧长大。 当固溶温度在 1 025 ℃以上时,随保温时间的延长和固溶温度的增加,晶粒增大,材料的屈服强度、抗拉强 度、断面收缩率以及硬度性能降低,其中当晶粒度为6级时,对应的屈服和硬度分别为1 010 MPa和 365HBW。 时效温度对材料的屈服强度和断面收缩率以及硬度、低温冲击韧性影响非常明显,在时效温度 775~795 ℃ 范围内,随着时效温度的升高,屈服强度和断面收缩率呈下降趋势。同时,当时效时间在 6.5~8 h 内改变时, 对性能的影响并不明显。**结论**获得了 UNS N07718 高温合金热处理性能参数,可用于指导深海油气开采用 UNS N07718 高温合金实际热处理操作。

关键词: UNS N07718 高温合金; 固溶处理; 时效处理; 微观组织; 室温拉伸; 低温冲击 **DOI**: 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.10.009

中图分类号: TG156.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-6457(2024)10-0098-09

Effect of Heat Treatment Process on Properties and Microstructure of UNS N07718 Superalloy for Deep-sea Oil and Gas Development

LIU Heng^{1a}, LUO Rui^{1a}, QIAN Xigen², SUN Xi², ZHAO Qinlan², CUI Liyun², YANG Cheng^{1a*}, DING Hengnan^{1b}

(1.a. School of Materials Science and Engineering, b. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Jiangsu Zhenjiang 212013, China; 2. Jiangsu Fujie High-end Equipment Manufacturing (Group) Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215233, China)

LIU Heng, LUO Rui, QIAN Xigen, et al. Effect of Heat Treatment Process on Properties and Microstructure of UNS N07718 Superalloy for Deep-sea Oil and Gas Development[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(10): 98-106. *通信作者 (Corresponding author)

收稿日期: 2024-07-31

Received: 2024-07-31

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20220548);高端装备机械传动全国重点实验室开放基金(SKLMT-MSKFKT-202219); 新金属材料国家重点实验室开放基金(2022-Z21); 黑龙江省先进摩擦焊技术与装备重点实验室开放基金(HWI-003)

Fund: Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20220548); Open Fund of National Key Laboratory of Mechanical Transmission for High-end Equipment (SKLMT-MSKFKT-202219); Open Fund of National Key Laboratory of Advanced Metal Materials (2022-Z21); Heilongjiang Province Advanced Friction Welding Technology and Equipment Key Laboratory Open Fund (HWI-003)

引文格式:刘恒,罗锐,钱喜根,等.热处理工艺对深海油气开采用 UNS N07718 高温合金性能及微观组织的影响[J].精密成形工程,2024,16(10):98-106.

ABSTRACT: The work aims to study the changes in the microstructure and mechanical properties of UNS N07718 at room temperature and low temperature after different heat treatments in deep-sea oil and gas production, and to obtain the best heat treatment parameters suitable for industrial production. According to the requirements of API 6ACRA Specification in the petroleum industry, different solution heat treatment parameters were used to compare the microstructural changes of UNS N07718 superalloy. The effects of comprehensive heat treatment on the mechanical properties of the materials were compared by room temperature tensile test, hardness test and low temperature impact test. The grain size at 1 040 °C solution temperature was significantly larger than that at 1 025 °C, which was mainly due to the complete dissolution of the δ precipitated phase, which reduced the pinning effect on the grain boundary and led to a rapid growth of grains. At above 1 025 °C, with the extension of holding time and the increase of solution temperature, the yield strength, tensile strength, section shrinkage and hardness properties of the material were reduced due to the increase of grain size. The aging temperature impact toughness. When the aging temperature was in the range of 775-795 °C, the yield strength and section shrinkage showed a downward trend with the increase of aging temperature. At the same time, the change of aging time in the range of 6.5-8 h had no obvious effect on the performance. The heat treatment performance parameters of UNS N07718 superalloy are obtained, which can be used to guide the actual heat treatment performance parameters of UNS N07718 superalloy are obtained.

KEY WORDS: UNS N07718 superalloy; solution treatment; aging treatment; microstructure; room temperature tensile; low temperature impact

UNS N07718 镍基高温合金因为其稳定的单相奥 氏体结构^[1],在-253~700 °温度范围内具有良好的抗 疲劳、抗氧化、抗辐射和耐腐蚀性能^[2],合金成分与 国内高温合金 GH4169 相似,其屈服强度是居 650 °C 以下变形高温合金之首^[3]。该合金主要析出相为 γ "、 $\gamma'、\delta$ 相,其中 γ "为体心四方 DO₂₂结构^[4],主要沿基 体的(100)面呈圆盘状共格析出,为主要强化相。在超 过 650 °C以上服役时,会使 γ "相粗大,而转化为与基 体共格的 δ 相。 δ 相为正交有序结构 (DO_a),如果在 晶界分布适量颗粒状 δ 相,能够有效阻碍晶界迁移, 控制晶粒长大,降低缺口敏感性^[5-7]。

热处理工艺对镍基高温合金的微观结构和力学 性能具有显著影响。通过固溶和时效等热处理工艺, 可以有效提升 UNS N07718 合金的力学性能。孔永华 等^[8]和任永海等^[9]对 GH4169 进行了标准热处理实 验,研究发现,延长固溶时间会增加合金中δ相的数 量,并在后续时效过程中δ相进一步长大。这一过程 消耗了合金中的铌元素,从而导致后续时效过程中γ' 相和γ"相的体积分数降低,从而使合金的强度、疲劳 寿命和延展性均有所下降。付建辉等^[10]和王岩等^[11] 研究了固溶温度与 UNS N07718 合金晶粒大小的关 系,并建立了晶粒长大模型。Luo 等^[12]研究了高温合 金长时间时效后碳化物的溶解机理及其对力学性能 的影响。郑欣等^[13]和高天明等^[14]研究了不同时效制 度对 Inconel 718 拉伸性能的影响,结果表明,高温 时效后合金的强度有所降低,而伸长率有所提高。

随着全球油气资源开采步伐的加速,传统陆上与 浅海油气资源已难以满足日益膨胀的能源需求^[15],促 使各国致力于深海油气资源的开发。深海油气开采装 备部件需在极端的高压、低温及复杂多载荷等恶劣环 境条件下稳定运行^[16-17]。UNS N07718 高温合金具备 室温下的优异拉伸强度、卓越的硬度表现以及低温域 的稳定冲击韧性,成为深海石油开采用材料的不二之 选,以往的研究聚焦于通过标准化的热处理工艺,即 960~980 ℃区间固溶处理辅以两级时效处理,来优化 UNS N07718 合金在航空航天极端服役环境下的高温 力学特性与抗蠕变能力^[18-19]。遗憾的是,针对 UNS N07718 合金在深海油气开采特定服役需求下的热处 理工艺,尤其是对低温性能的研究,目前尚显匮乏^[20]。 美国石油协会规定了针对石油和天然气钻井及生产 设备用时效硬化镍基合金的标准(API 6ACRA)。本 文基于此标准,研究 UNS N07718 合金在不同固溶处 理和时效处理综合处理下性能表现,旨在为该材料在 深海石油领域的应用提供参考。

1 实验材料及方案

材料为由某特材公司提供的 UNS N07718 高温 合金,治炼方式为 VIM (真空感应熔炼)+VAR (真 空自耗电弧熔炼)双联工艺。经均匀化处理后,再控 制始锻压下量和终锻温度将铸锭热锻成圆棒,利用牛 津大学 Foundry-Master 直读光谱仪及荧光分析校准 测试得到的 UNS N07718 高温合金的化学成分如表 1 所示。利用 JMatpro 11.0 热力学模拟软件镍基合金模 块得到 UNS N07718 平衡相图。根据 API 6ACRA 对 UNS N07718 的要求提出实验方案,利用 SXL-1400 马弗炉进行热处理实验,具体实验方案如表 2 所示, 试样 1、2、3 和 4 主要用于研究固溶制度对材料最终 性能的影响,试样 1、5、6 和 7 主要用于研究时效制 度对材料最终性能的影响,其中固溶处理冷却方式为

Tab.1 Composition of UNS N07718 nickel-based alloy $\mathrm{wt.\%}$						
Element	Standard	Actual value				
С	≤0.045	0.017				
Si	≤0.35	0.017				
Mn	≤0.35	0.010				
Р	≤0.010	0.0078				
Al	0.40-0.60	0.55				
Cu	≤0.23	0.013				
Cr	17.00-21.00	18.71				
Мо	2.80-3.30	3.09				
Ni	50.00-55.00	52.90				
Ti	0.80-1.15	0.96				
Nb+Ta	4.87-5.20	4.96				

表 1 UNS N07718 镍基合金的化学成分

表 2	UNS N07718 热处理具体实验方案				
Tab.2 Specific experimental process of UNS N07718					

Bal.

Bal.

neat treatment							
Sample No.	Solution treatment	Aging treatment					
1	1 025 °C×1 h						
2	1 040 °C×1 h	775 °C × 6.5 h					
3	1 025 °C×2 h	//S C×0.5 II					
4	1 040 °C×2 h						
5		795 ℃×6.5 h					
6	1 025 °C×1 h	775 °C×8 h					
7		795 °C×8 h					

水冷,时效处理冷却方式为空冷。

按照 GB/T 228.1—2021 要求, 切割直径 12.5 mm、 标距为 50 mm 的拉伸试棒, 之后利用 DDL100 型电 子万能试验机在 2 mm/min 速率下对固溶时效后的试 样进行室温拉伸测试。根据 GB/T 231.1-2018 布氏 硬度标准测试方法,采用 NEXUS 3300M 布氏硬度计 施加 29.42 kN 试验力, 保持 15 s 后, 卸除试验力, 测量压痕直径 d,得到布氏硬度值。按照 GB/T 229—2020 对试样进行-60 ℃低温冲击韧性测试,采 用 V 型开口的标准尺寸冲击试样(50 mm×10 mm× 10 mm)。对 1、2、3、4 试样进行单次固溶热处理 后,用 180[#]、400[#]、800[#]、1500[#]、2000[#]砂纸打磨, 利用直径 0.5 μm 的金刚石粉末抛光, 腐蚀剂采用 1.5 g CuSO₄+20 mL HCl+20 mL C₂H₅OH, 利用 ZEISS Axio Imager.M2m 金相显微镜(OM)和 TESCAN VEGA 扫描电镜(SEM)进行微观组织观测,后切割 成尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的方体试样,利用 X 射线衍射(XRD)对时效后试样进行物相分析,工作 电压为 45 kV, 扫描范围为 20°~100°, 扫描速度为 5 (°)/min, 设备型号为 Rigaku SmartLab。晶粒度检测 按照 GB/T 6394—2017 利用截线法测平均粒径。为了 保证试验材料具有相同的原始态组织,所有试验用的 试样均取自锻件 R/2 处(R 为棒材锻件的横截面半径)。 原始组织如图 1 所示,根据 GB/T 6394—2017《晶粒度 测试方法》检测晶粒度等级在 7 级以上,组织均匀细 小无明显混晶现象。



图 1 初始金相组织 Fig.1 Initial metallographic structure

2 结果与讨论

2.1 固溶处理对微观组织的影响

不同固溶制度下的 OM 如图 2 所示。从图 2 明显 可以观察到晶粒尺寸的变化,采用截线法分别测得图 2a、图 2b、图 2c 和图 2d 的晶粒尺寸为 43.8、61.3、 104.7 和 128.5 µm。根据 GB/T 6394—2017 金属平均 晶粒测定方法,对应的晶粒度等级分别为 6、5、3.5 及 3 级。结果表明,随着固溶处理保温时间的延长和 温度的增加,晶粒尺寸都有所增加。在图 2a 中观察 到部分晶粒已经长大,但大部分晶粒仍未长大,这是 明显的混晶现象。固溶温度 1 025 ℃在 UNS N07718 合金的静态再结晶温度之上^[7],在此温度以上进行保 温都会造成晶粒长大。在 1 025 ℃固溶温度的基础上 增加 15 ℃,晶粒度等级减少了 3 级左右,而延长 1 h 的保温时间只减少了 1 级晶粒度。这表明相对于延长 保温时间,提升固溶温度对晶粒尺寸的影响更为敏感。

在图 3a 中,可以观察到晶界区域散布着若干白 色颗粒状的析出相。相比之下,在图 3b 中,当固溶 温度提升至更高水平时,类似的白色析出相则变得难 以察觉,几乎不可见。图 3a 中 1 号点位置的 EDS 元 素分析结果如表 3 所示,通过比对 Ni 与 Nb 元素的 含量比例,确认这些颗粒状析出相为δ相,这一结论 与文献[21]中的描述相吻合。

进一步地,利用 JMatpro 热力模拟软件绘制的 UNS N07718 合金的平衡相图如图 4 所示,可以直观 了解到 δ 相的溶解温度在 1 035 ℃左右,这与先前的 研究结果一致^[22]。当合金在 1 040 ℃温度下进行固溶 处理时,δ 相将完全溶解于基体中,由此导致其对晶 界的钉扎效应不复存在^[23]。这一变化削弱了原本对晶 粒长大过程的抑制作用,最终促使晶粒尺寸显著增 大,形成较为粗大的晶粒结构。

Fe



a 1 025 ℃×1 h

b 1 025 ℃×2 h



c 1 040 ℃×1 h

d 1 040 ℃×2 h

图 2 不同固溶制度下的 OM Fig.2 OM under different solution process











表 3	图 2a 中 1 点 EDS 光谱分析
Tab.3 EDS spec	etrum analysis of point 1 in Fig.2a wt.9

Al	Nb	Ti	Cr	Ni	Fe	С
0.47	16.33	2.36	12.63	53.71	9.74	4.76

2.2 固溶、时效处理对力学性能的影响

2.2.1 拉伸性能

从图 5 的对比分析中可以明显观察到,在维持相同的时效条件下,当固溶温度设定为1025 ℃时,将 保温时间从1h延长至2h后,屈服强度显著下降了 135 MPa,抗拉强度也减少了70 MPa,而材料的塑性 变化则相对不明显。类似地,在1040 ℃的固溶温度 下,屈服强度和抗拉强度分别下降了 145 MPa 和



图 4 JMatpro 计算得到的 UNS N07718 相图 Fig.4 Phase diagram of UNS N07718 calculated by JMatpro



图 5 775 ℃×6.5 h 时效制度下不同固溶制度的拉伸性能 Fig.5 Tensile properties of different solid solution process under aging process of 775 ℃×6.5 h

50 MPa。这一趋势表明,随着固溶温度的升高及保温时间的延长,材料的强度性能出现明显下降,且韧性也呈现减弱趋势。

结合图 2 的实验结果,UNS N07718 合金的静态 再结晶温度在 1 018 ℃左右,在高于此温度下进行保 温处理均会促使晶粒发生不同程度的长大。保温时间 的延长和固溶温度的升高更是加剧了这一趋势。较小 晶粒尺寸的 1 号试样因细晶强化的作用,在强度和韧 性方面均表现出增强的效果。然而,随着晶粒尺寸的 增大,材料的强度和韧性却同步降低,这进一步验证 了晶粒尺寸对材料性能的关键影响。由 Hall-Petch 关 系可知,晶粒尺寸的增大直接导致了材料屈服强度的 降低,这也是材料性能变化的重要机制之一。

值得注意的是,根据 API 6ACRA 标准对 UNS N07718 合金的性能要求,屈服强度需维持在 827~1000 MPa 范围内(如图 5 中虚线所示)。1 号试样的屈服强度高达 1 010 MPa,4 号试样的屈服强度仅为 795 MPa,均未能完全符合实际应用中的强度标准。

在图 6 中可以发现,在统一的 1 025 ℃×1 h 固 溶处理条件下,当时效温度设定为 775 ℃时,将时效 时间从 6.5 h 延长至 8 h 后,屈服强度和抗拉强度分 别出现了 20 MPa 和 10 MPa 的轻微下降。然而,在 795 ℃的时效温度下,随着时效时间的延长,屈服强 度和抗拉强度却反常地增长了 25 MPa 和 20 MPa。这 一趋势与断面收缩率的变化相似,而延伸率则保持相 对稳定,未见显著变化。

进一步地,当保持时效时间不变、仅提高时效温 度时,观察到屈服强度、抗拉强度以及断面收缩率均 呈现出不同程度的下降趋势。这一现象与γ"相的析出 行为紧密相关^[21]。在 UNS N07718 高温合金中,基体 γ相与亚稳相γ"相之间存在共格关系,γ"相以圆盘状 形式弥散析出于基体中。然而,在长期时效过程中,



图 6 1 025 ℃×1 h 固溶处理下不同时效制度的拉伸性能 Fig.6 Tensile properties of different aging process after solution treatment at 1 025 ℃×1 h

这些析出相可能会变得粗大并逐渐失去与基体的共 格关系。值得注意的是,γ"相的主要析出峰值温度为 732~760 ℃,而实验中的 775 ℃时效温度更接近这一 峰值区。相比之下,在 795 ℃下,γ"相虽然也会析出, 但是更高的时效温度会导致 γ"相向更稳定的 δ 相转 变,δ相呈针状析出,对力学性能的增强作用并不明 显。已有文献^[17,22]明确指出,γ"相的体积分数与 UNS N07718 高温合金的室温性能之间存在强烈的正相关 关系。当γ"相的体积分数减小时,合金的拉伸性能及 塑性会相应下降。

然而,在本实验的温度范围内,改变时效温度并 未对拉伸性能产生显著影响,这表明在此条件下,时 效时间对拉伸性能的敏感性相对较低,而γ"相的体积 分数变化可能受到多种因素的共同调控。

2.2.2 硬度性能

不同固溶制度和时效制度下的硬度变化情况如 图 7 所示。从图 7a 可以看出,在相同的时效制度下, 随着固溶温度的增加和保温时间的延长,硬度值都有 所下降。在 1025 ℃下保温 2 h,硬度值相比 1 h 时降 低了 25HBW。这表明固溶温度和时间都对硬度的影 响很大,与屈服强度的变化趋势类似,固溶处理影响 了合金晶粒度,晶粒越大,硬度也越低。

从图 7a 可以观察到,在恒定的时效条件下,随着固溶温度的逐渐升高以及保温时间的延长,硬度值均呈现出显著的下降趋势。具体而言,当在1025 ℃下进行固溶处理时,随着保温时间由1h增加至2h,硬度值减少了25HBW。这印证了固溶处理工艺参数对合金性能的显著调控作用,与屈服强度的变化趋势相呼应。固溶处理通过改变合金的晶粒尺寸,进而对硬度产生直接影响。一般而言,晶粒尺寸的增加会导致硬度值的降低,因为较大的晶粒内部包含的缺陷和界面相对减少,从而减弱了抵抗局部变形的能力。





Fig.7 Hardness changes under different solid solution process and aging process: a) solid solution process; b) aging process

图 7b 展示了在 1 025 ℃保温 1 h 条件下,不同时 效制度对硬度变化的影响。研究结果显示,随着时效 温度的升高,硬度值普遍呈现下降趋势。具体而言, 当时效时间固定为 6.5 h 时,795 ℃下的硬度相较于 775 ℃时的降低了 27HBW,这一显著差异表明时效 温度对硬度的影响更为显著。

此外,在相同的时效温度下,延长时效时间并未 对硬度值产生明显影响,这进一步强调了时效温度作 为影响硬度性能的主导因素。此现象与屈服强度的变 化趋势相似,均可归因于第二相 γ"析出量的变化^[17,23]。 具体而言,时效温度越接近 γ"相峰值温度,其析出量 越多,在弥散强化的作用下增加了抵抗局部变形的能 力。因此,通过精确控制时效温度,可以有效调节合 金的硬度特性。Hall-Petch 关系式如式(1)所示。

$$S = S_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \tag{1}$$

式中: *S* 为屈服强度或者硬度指标; *S*₀ 和 *k* 均为 与晶粒尺寸相关的常数; *d* 为平均晶粒尺寸。

不同晶粒尺寸与屈服强度、硬度的关系如图 8 所 示,通过将图 2 中获得的晶粒大小数据与相应的硬度 及屈服强度结果进行线性拟合分析,得出以下结果: 屈服强度与晶粒尺寸平方根的倒数之间呈良好的线 性相关性,这一发现与经典的 Hall-Petch 定律相吻合, 证明了晶粒细化对提升材料屈服强度的积极作用。值 得注意的是,硬度参数与晶粒尺寸平方根的拟合效果 并不理想,显示出较低的相关性。这一现象可以归因 于硬度性能的多元影响因素:除了晶粒大小这一基本 因素外,后续时效过程中析出的强化相同样对硬度具 有显著贡献,且这些析出相对硬度的影响权重较大。 因此,硬度的变化是晶粒细化与析出强化共同作用的 结果,使单一晶粒尺寸参数难以全面解释硬度的复杂 变化规律。



图 8 不同晶粒尺寸与屈服强度、硬度的关系 Fig.8 Relationship between different grain sizes and yield strength and hardness

2.2.3 低温冲击性能

图 9a 为固溶处理时间对冲击韧性的影响,揭示 了在 1 025 ℃下延长固溶时间 1 h 能显著提升冲击韧 性,而此规律在 1 040 ℃条件下则出现相反的状况。 1 025 ℃固溶保温 2 h 的试样展现出最高的冲击功, 达到 136 J, 1 040 ℃保温 1 h 试样的冲击功为 134 J。 值得注意的是,1 号试样的冲击韧性低于 3 号试样的, 这归因于前者中 δ 第二相未完全溶解,导致断裂机制 偏向脆性;而当 δ 相完全溶解时,断裂模式则转变为 以位错滑移为主导的韧性断裂^[24]。对于普通合金材 料,晶粒尺寸越小,塑韧性越好,抗冲击性能也会越 优异,但在本研究中并未明显观察到 UNS N07718 合 金出现此规律。

图 9b 表明,时效温度是影响低温冲击韧性的主导因素,随着时效温度的升高,冲击吸收功显著降低。此外,通过对比试样1号与6号以及5号与7号数据,可以看出时效时间的延长同样会对低温冲击韧性产





Fig.9 Changes of low-temperature impact toughness at −60 °C under different solid solution process and aging process: a) solid solution process; b) aging process

生轻微的不利影响。相对来讲,时效温度相对时效时 间对冲击韧性影响更为显著。

不时效制度下 UNS N07718 材料的 XRD 图谱如 图 10 所示,在仅固溶后的样品中未发现明显的δ相 衍射峰,这是因为其含量较少。对比时效处理后的试 样,基体γ相在(200)和(220)晶面上的衍射峰减弱, 由于检测试样表面一致,可以判断在经过时效处理 后,基体γ相的含量变少,同时在时效后试样中可以 明显观察到在2 倍衍射角 95.7°时出现γ"(222)晶面的 衍射峰^[25],可以证明在时效过程中析出了γ"强化相。 γ"相是与基体共格的盘状颗粒,在γ相(100)面上析 出,在断裂变形中,由于γ"相与母相取向一致,可有 效减弱应力集中,从而提高冲击韧性。在5 号和7 号 试样上,即在时效温度 795 ℃试样上发现很小的δ相 的衍射峰,而在1 号和6 号试样上并不明显,这说明 随着时效温度的升高,γ"相会缓慢转变为稳定的针状 δ相^[26]。以往的研究已经证明在 UNS N07718 合金中



图 10 不时效制度下 UNS N07718 材料的 XRD 图谱 Fig.10 XRD patterns of UNS N07718 material under different aging process

δ相析出会降低屈服强度和抗拉强度,对合金硬化并 无任何显著的贡献^[24],而δ相的析出、含量的增多必 然会导致 γ"相含量降低,从而解释了1号试样与6 号试样在力学性能方面的表现均优于5号与7号试样。

3 结论

研究了深海石油用 UNS N07718 镍基合金的热 处理工艺对组织与性能的影响规律。主要结论如下:

1)固溶制度对 UNS N07718 高温合金的微观组 织影响较大,在1025 ℃以上延长保温时间和增加固 溶温度均会引起晶粒长大,且固溶温度更为敏感。在 1025 ℃保温条件下,δ相残留于晶界处;在1040 ℃ 保温1h,δ相完全消失,晶粒等级达到3.5级。

2)随着固溶温度的升高和时间的延长,屈服强 度、抗拉强度、硬度以及断面收缩率均有所降低,这 主要归因于细晶强化效应。此外,固溶制度对低温冲 击韧性影响并不大。

3)在 775~795 ℃时效处理条件下,时效温度对材料的屈服强度、断面收缩率、硬度及冲击韧性均有显著影响。这主要是受到γ"相含量的影响,在较低的时效温度下,拉伸性能、硬度和韧性都更好,但时效时间的改变对合金性能的影响并不明显。

参考文献:

- LUO R, ZHOU Y M, GAO P, et al. Characterization of Hot Workability of IN617B Alloy Using Activation Energy, Zener-Hollomon Parameter and Hot Processing Maps[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 5141-5150.
- [2] CHEN L L, DING H N, LIU T, et al. Thermal Deforma-

tion Behavior and Microstructure Evolution of GH4169 Superalloy under the Shear-Compression Deformation Conditions[J]. Materials & Design, 2021, 212: 110195.

- [3] DING X, HUANG D W, YAN X J. Low Cycle Fatigue Behavior of Superalloy GH4169 in High Temperature Gas Environment[J]. Key Engineering Materials, 2019, 827: 336-342.
- [4] 刘永长,郭倩颖,李冲,等. Inconel718 高温合金中析 出相演变研究进展[J]. 金属学报, 2016, 52(10): 1259-1266.
 LIU Y C, GUO Q Y, LI C, et al. Recent Progress on Evolution of Precipitates in Inconel 718 Superalloy[J].
- Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(10): 1259-1266.
 [5] HUANG J N, HUANG Z, DU H, et al. Effect of Aging
- Temperature on Microstructure and Tensile Properties of Inconel 718 Fabricated by Selective Laser Melting[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2022, 75(6): 1403-1410.
- [6] LUO H, LI X Q, PAN C L, et al. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Alloy 718 Fabricated by Selective Laser Melting Following Different Post-Treatments[J]. Rare Metals, 2021, 40(11): 3222-3234.
- [7] 代朋超, 王资兴, 马天军. GH4169 合金中 δ 相析出及 其对冲击性能影响研究[J]. 宝钢技术, 2018(5): 41-44. DAI P C, WANG Z X, MA T J. Study on the δ Phase Precipitation and Its Effect on the Impact Property in GH4169 Alloy[J]. Baosteel Technology, 2018(5): 41-44.
- [8] 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.
 KONG Y H, LIU R Y, CHEN G S, et al. Effect of Different Solution Treatments on Tensile Properties of GH4169 Alloy at Room Temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S2): 616-620.
- [9] 任永海,程治,王龙祥,等. 锻态 GH4169 合金热变形 本构方程及热加工图[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 148-155.
 REN Y H, CHENG Z, WANG L X, et al. Constitutive Equation for Hot Deformation and Hot Processing Man

Equation for Hot Deformation and Hot Processing Map of Wrought GH4169 Superalloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 148-155.

- [10] 付建辉,周扬,赖宇,等. 固溶处理对 GH4169 合金晶 粒长大和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(1): 75-80.
 FU J H, ZHOU Y, LAI Y, et al. Effect of Solution Treatment on Grain Growth and Hardness of GH4169 Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(1): 75-80.
- [11] 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(S1): 176-179.

WANG Y, LIN L, SHAO W Z, et al. Effect of Solution Treatment on Microstructure and Properties of GH4169 Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(S1): 176-179.

- [12] LUO R, LIU Q T, GAO P, et al. Effect of Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Haynes
 230 Superalloy during Long-Term Aging at 700 °C[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 947: 169495.
- [13] 郑欣,师玉英,陈玉宝. 时效处理对 GH4169 合金组 织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(6): 162-165.
 ZHENG X, SHI Y Y, CHEN Y B. Effect of Aging Treatment on Microstructure and Properties of GH4169 Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(6): 162-165.
- [14] 高天明,程晓农,罗锐,等. 时效处理对 GH4169 合金 显微组织及高温拉伸变形行为的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(8): 119-123.
 GAO T M, CHENG X N, LUO R, et al. Effect of Aging Treatment on Microstructure and High Temperature Tensile Deformation Behavior of GH4169 Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(8): 119-123.
- [15] LEVIN L A, WEI C L, DUNN D C, et al. Climate Change Considerations Are Fundamental to Management of Deep-Sea Resource Extraction[J]. Global Change Biology, 2020, 26(9): 4664-4678.
- [16] 屈少鹏, 尹衍升. 深海极端环境服役材料的研究现状 与研发趋势[J]. 材料科学与工艺, 2019, 27(1): 1-8. QU S P, YIN Y S. Research Status and Development Trend of Service Materials in Deep Sea Extreme Environment[J]. Materials Science and Technology, 2019, 27(1): 1-8.
- [17] ADUMENE S, KHAN F, ADEDIGBA S, et al. Offshore Oil and Gas Development in Remote Harsh Environments: Engineering Challenges and Research Opportunities[J]. Safety in Extreme Environments, 2023, 5(1): 17-33.
- [18] 李晴,李成龙,钟裕国,等. 固溶温度对 UNS N07718 合金组织及冲击性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 78-82.
 LI Q, LI C L, ZHONG Y G, et al. Effects of Solution Temperature on Microstructure and Impact Properties of UNS N07718 Alloy[J]. Special Steel, 2023, 44(1): 78-82.
 [19] 兰涛,郭维华,梁刚,等. 固溶处理对标准 GH4169高
- [19] 三海, 郭维华, 梁刚, 等. 固裕处理对标准 GH4169高 温合金性能的影响[J]. 东方汽轮机, 2023(4): 65-67. LAN T, GUO W H, LIANG G, et al. Effect of Solid Solution on Properties of Standard GH4169 Superalloy[J]. Dongfang Turbine, 2023(4): 65-67.
- [20] NASCIMENTO J L, BARBOSA C, FERNANDES J L. Effect of Different Heat Treatment Conditions on the Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 718 Nickel Based Super Alloy Used in Petroleum Production[J]. Practical Metallography, 2009, 46(12): 640-656.
- [21] DU J H, LV X D, DENG Q, et al. Effect of Solution Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of IN718 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(9): 2359-2365.

- [22] DONG J X, XIE X S, ZHANG S H. Coarsening Behavior of γ" Precipitates in Modified Inconel 718 Superalloy[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995, 33(12): 1933-1940.
- [23] DEHMAS M, LACAZE J, NIANG A, et al. TEM Study of High-Temperature Precipitation of Delta Phase in Inconel 718 Alloy[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2011, 2011: 940634.
- [24] ANDERSON M, THIELIN A L, BRIDIER F, et al. δ Phase Precipitation in Inconel 718 and Associated Mechanical Properties[J]. Materials Science and Engineer-

ing: A, 2017, 679: 48-55.

- [25] VIKRAM R J, SINGH A, SUWAS S. Effect of Heat Treatment on the Modification of Microstructure of Selective Laser Melted (SLM) IN718 and Its Consequences on Mechanical Behavior[J]. Journal of Materials Research, 2020, 35(15): 1949-1962.
- [26] SINGH S R, MOTE R G, MISHRA S K. The Effect of Microstructures and Precipitates (γ' , γ'' , δ) on Machinability of Inconel-718 Nickel-Based Superalloy in Turning Process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 82: 374-389.