

频率对增材制造 GH4169 镍基合金的高周疲劳性能影响

尤学文¹ 宋新莉¹ 吴传栋¹ 陈清勇²

(1. 武汉科技大学先进耐火材料全国重点实验室, 武汉 430081; 2. 武汉天昱智能制造有限公司, 武汉 430080)

摘要 采用电弧加微铸锻增材制造法制备 GH4169 合金, 并对其进行 1 050 °C 的均匀化和 720 °C 的时效处理, 采用光学显微镜、疲劳试验机及扫描电镜等对合金组织、疲劳性能和断口形貌进行分析。结果表明, 经均匀化与时效处理以后, 合金基体组织为 γ 相, 同时有少量孪晶与析出相。频率为 30 Hz 与 120 Hz 时, 合金疲劳强度分别为 470 MPa 与 453 MPa。两种频率下合金疲劳裂纹萌生位置在孪晶界、合金表面或缺陷处。疲劳裂纹扩展区域有疲劳条纹与二次裂纹。

关键词 增材制造; 镍基合金; 频率; 高周疲劳; 疲劳裂纹

中图分类号 TG146.1⁺5; TG665

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250215

Influence of Frequency on High-cycle Fatigue Properties of Additive Manufactured GH4169 Nickel-based Alloy

YOU Xuewen¹, SONG Xinli¹, WU Chuandong¹, CHEN Qingyong²

(1. State Key Laboratory of Advanced Refractories, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2. Wuhan Tianyu Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Wuhan 430080)

Abstract: GH4169 alloy prepared by arc and interlayer rolling additive manufacturing method was homogenized at 1 050 °C and aged at 720 °C. The microstructure, fatigue life and fracture morphology of GH4169 alloy were analyzed by optical microscope, fatigue testing machine and scanning electron microscope. The results indicate that the microstructure of matrix is mainly composed of γ phase with small amount of twinning and precipitated phases. The fatigue strengths are 470 MPa and 453 MPa with frequencies of 30 Hz and 120 Hz, respectively, and fatigue cracks initiate at twin boundaries, surfaces or defect sites. Moreover, fatigue fringes and secondary cracks are observed at fatigue crack propagation region.

Key Words: Additive Manufacturing, Nickel-based Alloy, Frequency, High-cycle Fatigue, Fatigue Crack

GH4169 合金因具有较高的强度、抗氧化性能及疲劳性能被广泛用于航空航天、舰船等高温部件, 如涡轮叶片、涡轮盘等^[1-3]。传统制备 GH4169 合金零件的流程为合金熔炼、铸造、锻造、热处理及切削加工, 工艺流程较长^[4-5]。增材制造是一种通过逐层堆积材料来制造三维实体的近净成形技术。与传统减材(切削加工)不同, 增材制造通过数字化模型直接成形, 具有设计自由度高、材料利用率高及可快速成型等优势^[6-7], 而金属粉末烧结增材制造材料具有致密度差, 各向异性等缺陷, 但采用熔丝加层间轧制方法制造的零件致密度高, 性能优异^[8-9]。GH4169 合金是一种时效强化材料, 时效热处理调控纳米 γ'' (Ni_3Nb) 析出相体积分, 对提高其综合力学性能具有重要作用^[10-11]。COZAR R 等^[12]

通过改变镍基合金成分, 获得 γ' 与 γ'' 共沉积结构。RIELLI V V 等^[13]研究了热变形参数对 GH4169 合金中析出行为的影响规律与机理。YOU X W 等^[14]研究了时效对增材制造 GH4169 合金组织性能的影响, 发现 γ'' 与 γ' 析出相呈三明治结构。由于 GH4169 合金零件服役过程承受循环应力作用, 因此疲劳断裂是其发生失效的重要方式^[15-17]。研究该合金的疲劳断裂行为与机理具有积极意义。

本研究对电弧加微铸锻 GH4169 合金进行固溶与时效热处理, 并研究频率对该合金的疲劳强度与断裂形貌特征的影响, 分析其断裂机制, 旨在为高性能 GH4169 合金的应用提供参考。

收稿日期: 2025-05-27; 修订日期: 2025-07-01

基金项目: 湖北省技术创新专项基金资助项目(2022BEC025)

第一作者: 尤学文, 男, 2000 年出生, 硕士研究生, E-mail: 1814254202@qq.com

通信作者: 宋新莉, 女, 1973 年出生, 教授, E-mail: 183546940@qq.com

引用格式: 尤学文, 宋新莉, 吴传栋, 等. 频率对增材制造 GH4169 镍基合金的高周疲劳性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(6): 889-893.

YOU X W, SONG X L, WU C D, et al. Influence of frequency on high-cycle fatigue properties of additive manufactured GH4169 nickel-based alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(6): 889-893.

1 试验材料与方法

采用电弧加微铸锻增材制造方法制备 GH4169, 原材料直径为 $\phi 1$ mm 的合金丝, 其成分(质量分数, 下同): Ni 为 53.57%, Cr 为 18.10%, C 为 0.04%, Si 为 0.24%, Mo 为 3.04%, Ti 为 0.85%, Mn 为 0.32%, Nb 为 5.13%, Co 为 0.82%, Al 为 0.46%, 余量为 Fe。增材制造的合金块先在 1 050 $^{\circ}\text{C}$ 下进行均匀化处理, 然后在 720 $^{\circ}\text{C}$ 时效处理 16 h。热处理后的合金依次用 180~2 000 目砂纸进行机械磨抛, 再用 1.0 μm 抛光膏抛光至镜面, 采用配比为 5% 的 CuCl_2 +100 mL 的 HCl +100 mL 的 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 的试剂腐蚀 10 s, 借助 Axio-plan 2 imaging 光学显微镜分析合金组织。图 1 为拉伸和疲劳试样示意图。按 GB/T 228.1-2021 将热处理后的合金加工成标准棒状拉伸试样, 见图 1a。采用 INSTRON 8801 试验机测试室温下合金的力学性能, 拉伸速率为 0.075 mm/min。按照 GB/T 3075-2021 加工疲劳试样, 见图 1b。为了减小试验误差, 测试前依次采用 200~2 000 目的砂纸对试样表面进行打磨抛光至试样表面粗糙度 $R_a \leq 0.2 \mu\text{m}$ 。疲劳测试为室温条件, 应力比为 0.1, 频率分别为 30 Hz 与 120 Hz, 波形为正弦波, 采用应力控制。试验过程采用升降法, 得到加载应力与断裂周次, 绘制应力-疲劳寿命(S-N)曲线, 结合 Basquin 公式, 拟合得到试验材料的疲劳强度。借助 Nova Nana 扫描电镜分析疲劳断口形貌。

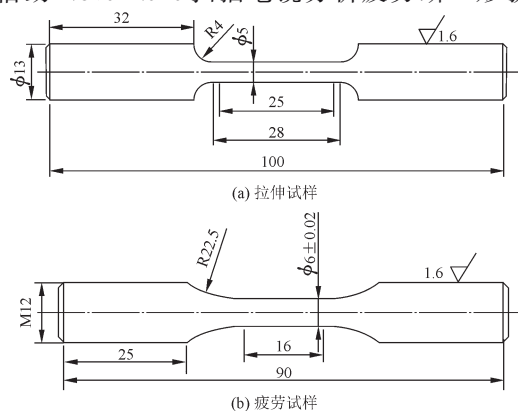


图1 拉伸和疲劳试样示意图

Fig.1 Dimension of tensile and fatigue specimen

2 试验结果与分析

2.1 热处理组织

图 2 为电弧+微铸锻增材制造 GH4169 合金经 1 050 $^{\circ}\text{C} \times 1$ h 固溶加 720 $^{\circ}\text{C} \times 16$ h 时效处理 16 h 后的金相组织。可以看出, 基体组织主要为 γ 相, 有少量孪晶与析出相, 电弧加微铸锻制造的 GH4169 合金致密度

高, 孔洞缺陷数量较少。YOU X W 等^[14]研究表明, GH4169 合金时效处理后基体中析出相主要是 Nb 的碳化物与纳米尺寸的 Ni_3Nb 、 Ni_3Al 等析出相。图 3 为 GH4169 合金的室温拉伸应力-应变曲线。可以看出, 合金屈服强度为 1 176 MPa, 抗拉强度为 1 375 MPa, 伸长率为 16.0%。GH4169 镍基合金时效后基体中分布纳米尺寸的 Ni_3Nb 、 Ni_3Al 等析出强化和固溶强化作用等, 使得该合金的强度较高。

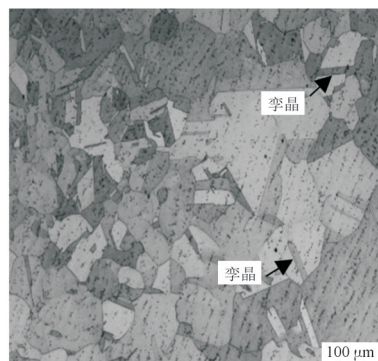


图2 电弧+微铸锻增材制造 GH4169 合金经 1 050 $^{\circ}\text{C} \times 1$ h 固溶加 120 $^{\circ}\text{C}$ 时效处理 16 h 后金相组织

Fig.2 Metallographic structure of GH4169 alloy by arc and micro forging additive manufacture after solution at 1 050 $^{\circ}\text{C}$ for 1 h and aging at 720 $^{\circ}\text{C}$ for 16 h

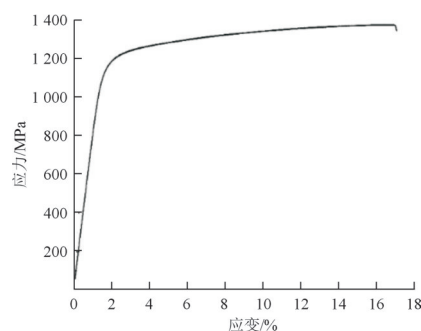


图3 GH4169 合金的室温拉伸应力-应变曲线

Fig.3 Tensile stress-strain curve of GH4169 alloy at room temperature

2.2 疲劳强度

图 4 为不同频率电弧加微铸锻 GH4169 合金室温

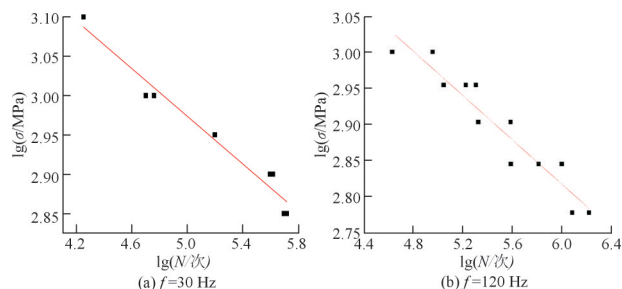


图4 GH4169 合金高周疲劳寿命曲线

Fig.4 High-cycle fatigue life curves of GH4169 alloy

高周疲劳寿命曲线。可以看出, $\lg\sigma$ 与 $\lg N$ 之间成线性相关。

Basquin 公式:

$$\sigma^m N = c \quad (1)$$

式中, σ 为应力; m 、 c 为常数; N 为循环周次。

对式(1)取对数, 得到

$$\lg\sigma = a + b \lg N \quad (2)$$

式中, $a = \frac{\lg c}{m}$, $b = \frac{-1}{m}$ 。

根据 Basquin 公式计算可知, 应力比 $R=0.1$ 时, 频率为 30 Hz, 疲劳强度为 470 MPa。

以下两式为应力比 $R=0.1$, 频率分别为 30 Hz 与 120 Hz 时, 循环应力与循环周次关系:

$$\lg\sigma = 3.73 - 0.15108 \lg N \quad (3)$$

$$\lg\sigma = 3.73 - 0.15236 \lg N \quad (4)$$

计算可知, 频率为 30 和 120 Hz 时, 疲劳强度分别为 470 和 453 MPa。结果表明, 当应力比相同, 频率从 30 Hz 增大至 120 Hz, 疲劳强度降低了 3.6%。主要原因是不同频率影响加载的应变速率与材料内部的温度变化, 进而影响基体中位错的运动。频率越高, 应变速

率增大, 加速材料内部位错运动, 导致材料内部变形不均匀加剧, 位错在晶界、孪晶界或析出相界面塞积, 产生应力集中, 易于诱发微裂纹, 降低疲劳强度。另外, 频率越高, 材料内部没有充分时间通过热传递达到热平衡, 温度升高, 加速表面腐蚀过程, 使得表面更易于形成微裂纹, 也会降低疲劳强度。

2.3 疲劳断口形貌

图 5 和图 6 分别是频率为 30 Hz 和 120 Hz 下 GH4169 合金的疲劳断口与疲劳裂纹源形貌。从图 5 可以看出, 断口形貌主要分为疲劳裂纹萌生区、裂纹扩展区与瞬断区, 随应力增大到 1 000 MPa, 疲劳裂纹扩展区域面积大幅减少。当峰值应力为 700 MPa 时, 疲劳裂纹主要在合金的内部萌生。由图 5d 可知, 疲劳裂纹主要在孪晶界位置萌生。随应力增大, 疲劳裂纹源主要在表面(见图 5e 和图 5f)。从图 6 可以看出, 加载应力为 600 MPa 时, 疲劳裂纹的萌生区域也是在孪晶界位置(见图 6a 和图 6d), 加载应力为 700 MPa 时, 疲劳裂纹在基体未熔合区或缺陷位置萌生(见图 6b 和图 6e), 应力增大到 800 MPa, 疲劳裂纹源出现在合金的表面(见图 6c 和图 6f)。

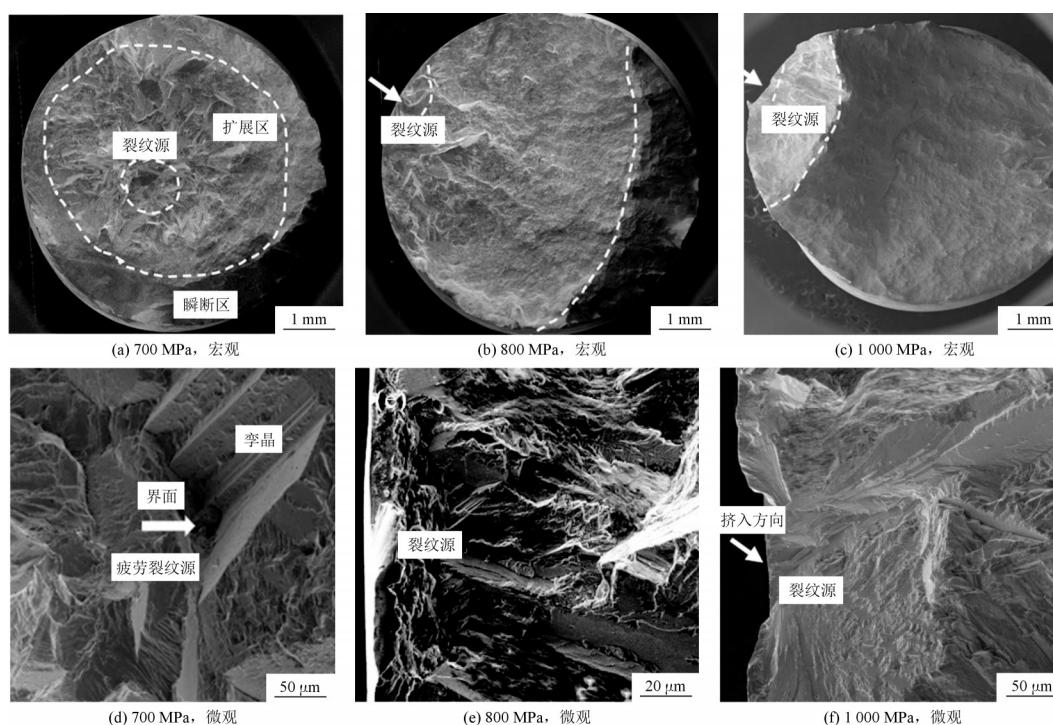


图 5 频率为 30 Hz 时合金疲劳断口与裂纹源区形貌

Fig.5 Morphologies of fatigue fracture and fatigue crack source at 30 Hz

由图 5 和图 6 可知, 无论是高频率或低频率条件下, 疲劳裂纹萌生位置主要有孪晶界、基体中缺陷位置与合金表面。GH4169 合金固溶时效以后奥氏体基体中有大量孪晶, 在循环应力作用下, 位错运动到孪晶界面, 由于取向发生变化, 位错在孪晶界面塞积, 造成应

力集中, 导致裂纹在孪晶界面处萌生。频率为 30 Hz 时, 循环应力分别为 800 MPa 与 1 000 MPa。频率为 120 Hz, 最大循环应力为 800 MPa 时, 疲劳裂纹源均在合金表面。原因是在较高的循环应力作用下, 合金局部塑性变形, 位错沿滑移面运动, 位错运动到合金表

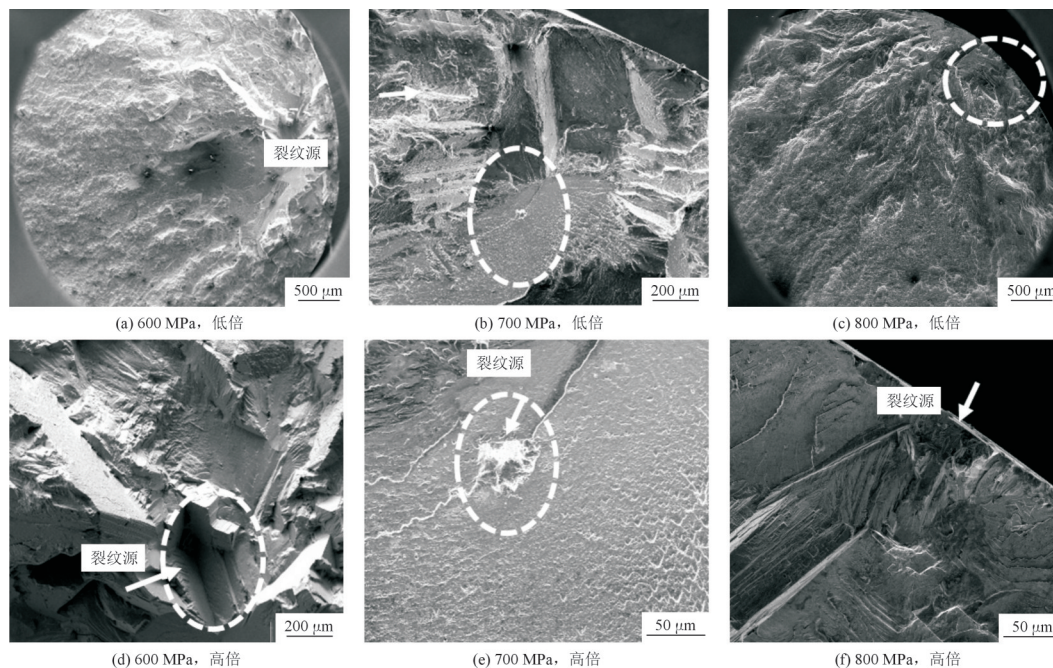


图6 频率为 120 Hz 下合金疲劳断口与裂纹源区形貌

Fig.6 Morphologies of fatigue fracture and fatigue crack source at 120 Hz

面,形成驻留滑移带,在合金表面造成高出或低于表面的形貌,进而导致疲劳裂纹的形成。此外,增材制造过程中,合金基体中未熔合区或析出相位置也会成为疲劳裂纹源区。由图 5b 和图 5e 可知,疲劳裂纹在 GH4169 合金中未熔合区缺陷位置处形成。当加载应力较高时,材料发生塑性变形,位错沿滑移面运动到未熔合区产生塞积,导致应力集中,造成裂纹的萌生。PRZYBLA C P 等^[18]研究发现,当缺陷较少时,驻留滑

移带成为疲劳裂纹产生的主要因素。本研究中合金在高应力作用下发生塑性变形,位错移除晶体表面,形成驻留滑移带是疲劳裂纹在表面形成的主要原因之一。

图 7 是频率分别为 30 Hz 与 120 Hz 不同峰值应力作用下疲劳裂纹扩展区形貌。可以看出,疲劳裂纹扩展区高低不平,疲劳裂纹在扩展过程中均产生了大量的疲劳条纹,同时出现二次裂纹。合金在低频与高频率作用下,疲劳裂纹一旦萌生,在循环应力作用下,疲

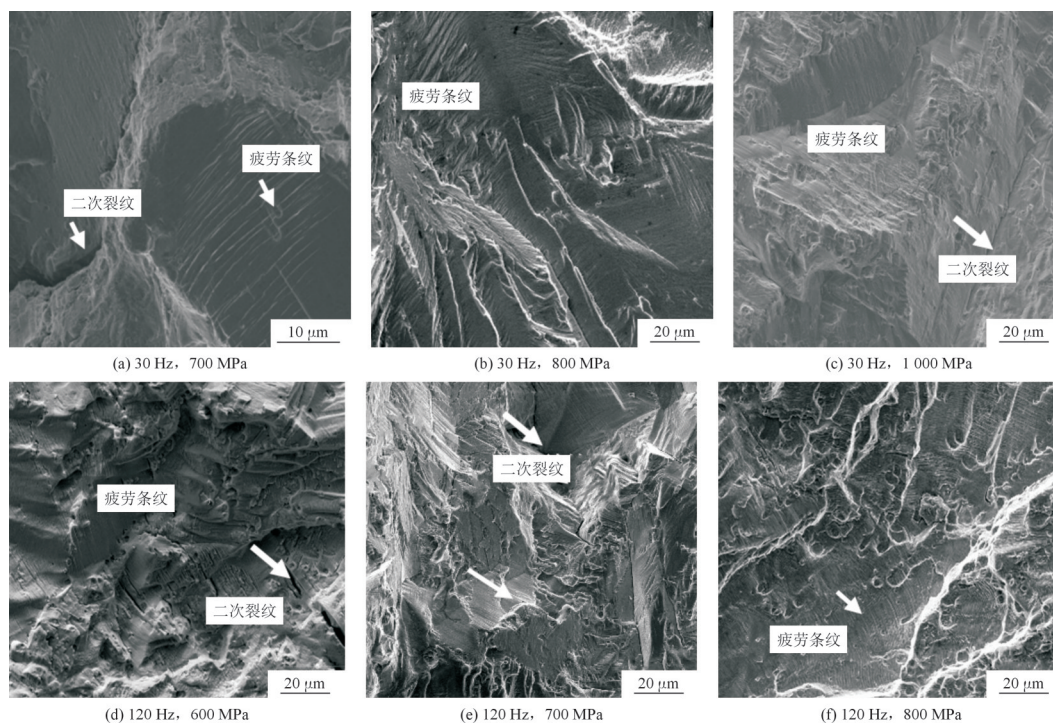


图7 频率为 30 Hz 与 120 Hz 不同应力下合金的疲劳裂纹扩展区形貌

Fig.7 Morphologies of fatigue crack propagation zone at 30 Hz and 120 Hz

劳裂纹会继续扩展。本研究中应力比 $R=0.1$, 波形为正弦波, 循环应力增大, 疲劳裂纹扩展, 当应力减小时, 裂纹尖端钝化, 每循环一周次, 就会产生一个疲劳条纹。此外, 该合金热处理后得到 γ 相, 基体中有孪晶与析出相。随循环周次增大, 累积损伤导致合金发生塑性变形, 造成位错运动, 位错运动到孪晶界或遇到析出相发生塞积, 造成应力集中。当应力集中超过析出相与基体结合强度就会产生裂纹。此外, 晶界与孪晶界也阻碍位错运动与裂纹扩展, 随循环应力增大, 由于循环累积损伤在很短时间内就会导致裂纹萌生与扩展, 因此高应力疲劳裂纹扩展区域比低应力小。

3 结 论

(1) 电弧加微铸锻制备的 GH4169 合金经过固溶加时效热处理, 组织主要是 γ 相, 基体中有少量孪晶与析出相。

(2) 应力比 $R=0.1$, 频率分别为 30 Hz 和 120 Hz 时, GH4169 合金在室温的疲劳强度分别为 470 MPa 与 453 MPa。

(3) 两种频率条件下 GH4169 合金的疲劳裂纹萌生位置主要是在孪晶界、基体缺陷与合金表面。疲劳裂纹扩展区域有疲劳条纹与二次裂纹。

参 考 文 献

- [1] BOYER R R, COTTON J D, MOHAGHEGH M, et al. Materials considerations for aerospace applications [J]. MRS Bulletin, 2015, 40 (12): 1 055-1 065.
- [2] AKCA E, GURSEL A. A review on superalloys and IN718 nickel-based inconel superalloy [J]. Period. Eng. Nat. Sci., 2015, 3 (1): 15-27.
- [3] SEMIATIN S L, LEVKULICH N C, SAURBER A E, et al. The kinetics of precipitate dissolution in a nickel-base superalloy [J]. Metall. Mater. Trans., 2017, A48 (11): 5 567-5 578.
- [4] LAN J, HUANG H, MAO H J, et al. Phase transformation and grain growth behavior of superalloy IN718 during heat treatment [J]. Materials Today Communications, 2020, 24: 101 347.
- [5] LI Y J, YANG Y. Grain refinement of as-cast superalloy IN718 under action of low voltage pulsed magnetic field [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2011, 21 (6): 1 277-1 282.
- [6] 袁战伟, 常逢春, 马兴瑞, 等. 增材制造镍基高温合金研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36 (3): 1-8.
- [7] 栗子林, 路超, 程格, 等. 选区激光熔化 GH4169 成型件微观组织及力学性能研究 [J]. 应用激光, 2019, 39 (1): 48-52.
- [8] PAN Z Q, ZHANG H O, SONG X L, et al. Influence of micro-rolling on the strength and ductility of plasma-arc additively manufactured Ti-6Al-4V alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 465-473.
- [9] 潘子钦, 张海鸥, 王桂兰, 等. 等离子弧熔丝增材制造 TC4-DT 钛合金组织与疲劳断裂行为 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (9): 1 154-1 158.
- [10] SHI R, MCALLISTER D P, ZHOU N, et al. Growth behavior of γ'/γ'' coprecipitates in Ni-Base superalloys [J]. Acta Mater., 2019,

164: 220-236.

- [11] RIELLI V V, GODOR F, GRUBER C, et al. Effects of processing heterogeneities on the micro- to nanostructure strengthening mechanisms of an alloy 718 turbine disk [J]. Materials and Design, 2021, 212: 110 295.
- [12] COZAR R, PINEAU A. Morphology of γ' and γ'' precipitates and thermal stability of Inconel 718 type alloys [J]. Metall. Trans., 1973 (4): 47-59.
- [13] RIELLI V V, FARBI E, GODOR F, et al. γ' and γ'' co-precipitation phenomena in directly aged alloy 718 with high δ -phase fractions [J]. Materials and Design, 2024, 241: 112 961.
- [14] YOU X W, SONG X L, GENG W, et al. Influence of ageing treatment on microstructure and mechanical properties of GH4169 alloy prepared using wire arc additive manufacturing [J]. Metals, 2024, 14: 1 111.
- [15] PANG H T, REED P A. Microstructure effects on high temperature fatigue crack initiation and short crack growth in turbine disc nickel-base superalloy Udimet 920Li [J]. Materials Science and Engineering, 2007, A448: 67-69.
- [16] ZHANG P, ZHU Q, CHEN G, et al. Grain size based low cycle fatigue life prediction model for nickel-based superalloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28: 2 102-2 106.
- [17] 孙志军, 陈皓晖, 赵云松, 等. 镍基铸造高温合金高周疲劳研究进展 [J]. 失效分析与预防, 2024, 19 (3): 216-222.
- [18] PRZYBLA C P, MCDOWELL D L. Microstructure sensitive extreme value probabilities for high cycle fatigue of Ni-base superalloy IN100 [J]. International Journal of Plasticity, 2010, 26 (3): 372-394.

(编辑: 刘晨辉)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵, 文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造
(关注铸造及有色合金
领域重要研究成果)



压铸界
(压铸领域最新动态
及研究)



青稞讲堂
(金属领域青年科学家
最新研究成果)



特种铸造及有色
合金杂志
(文章动态时刻关注)