



高纯度、低偏析 GH4169 合金研究进展

李二行 张景海 贾东峰 张宝 张龙 马静
(西安钢研功能材料股份有限公司, 西安 710000)

摘要: 镍基高温合金 GH4169 镍含量高达 50% 以上, 是一种以析出强化为主、固溶强化和晶界强化为辅的变形高温合金, 在 650℃ 以下高温环境工作时, 不仅具有优异的高温强度、极高抗氧化和耐腐蚀性能, 而且还具有良好的焊接性能, 广泛应用于航空航天发动机等高温零部件。随着我国航空航天发动机不断的更新换代, 对内燃机和发动机用镍基高温合金的高温热强性和耐候性提出了更高的要求。针对 GH4169 合金纯净化制备方法、焊接性能、热加工工艺和锻造等方面, 系统介绍了制备技术和热加工的作用, 总结了最优的熔炼技术、焊接工艺和热加工技术, 分析了 GH4169 变形高温合金的应用和发展趋势。

关键词: GH4169 高温合金; 强化相; 高温热强性; 冶炼工艺

中图分类号: TG142.33; V252 **文献标识码:** A

Research Progress of High Purity and Low Segregation GH4169 Alloy

Li Erhang Zhang Jinghai Jia Dongfeng Zhang Bao Zhang Long Ma Jing
(Xi'an Gangyan Functional Materials Co., Ltd., Xi'an 710000)

Abstract: Ni-base superalloy GH4169, which contains more than 50% Ni, is a deformed superalloy with precipitation strengthening, solution strengthening and grain boundary strengthening, not only has excellent high temperature strength, extremely high oxidation resistance and corrosion resistance, but also has good welding and mechanical properties, widely used in aerospace engines, petrochemical, nuclear industry and other fields. With the development of industrialization in our country, the high temperature heat strength and weatherability of Ni-base superalloy for internal combustion engine and engine are required. In view of GH4169 alloy purification preparation method, welding performance, hot working process and so on, the preparation technology and the effect of strengthening phase alloying are introduced systematically, and the different smelting process and hot working technology are summarized, the application and development trend of GH4169 deformed superalloy are prospected.

Key words: GH4169 superalloy; strengthening phase; high temperature thermal strength; smelting process

1 引言

高温合金是 20 世纪 30 年代后期发展起来的一种新型航空金属材料, 国外率先研究高温合金。英国对电热丝材料进行了成分改性, 在 80Ni-20Cr 基础上加

入了少量 Al 和 Ti, 形成强化相 γ' 相, 学者为了进一步提高镍基合金高温强度, 在合金中加入了 W、Mo、Co 等元素, 同时增加了 Al 和 Ti 的含量, 成功研发了 Nimonic 系列合金。苏联研制了 ЖС-6K 合金, 美国研制了 Inconel 合金, 用以制作内燃机^[1]。

我国于 20 世纪 60 年代开始研发变形高温合金, 通过设计成分配比、改型研究、优化工艺等, 深入研究合金强化相的组织 and 性能, 成功研制出了其性能与美国 Inconel 718 性能相仿的高温合金, 牌号为 GH4169, 被称为“发动机的心脏”。GH4169 是一种析出强化型镍基变形高温合金, 具有面心立方结构, 以奥氏体 γ 为基体相, 以体心立方 γ' (Ni_3Nb) 为主要强化相, 以面心立方 γ'' ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})$) 为辅助强化相, δ 相和碳化物等组成^[2]。在 $-253\sim 650^\circ\text{C}$ 具有优良的高温强度、蠕变抗力、高温疲劳强度和抗氧化、耐腐蚀性能, 被广泛的应用于航空航天、汽车、核能、石油化工等领域, 如图 1 所示。为满足这些领域在高温持久蠕变、抗疲劳性能等方面提出的更高要求, 科研人员对 GH4169 在合金成分的优化设计、制备方法、冶炼工艺、组织和力学性能等方面开展了大量的研制工作^[3]。

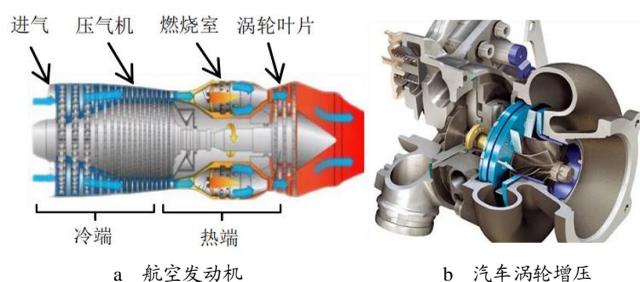


图 1 高温合金应用

随着我国航天事业的快速发展, 国内高温合金总需求从 2 万吨增加至 6.2 万吨, 供给从 1.3 万吨增加至 3.8 万吨。虽然国内高温合金供给大幅增长, 但是从供需差距来看, 高温合金供需矛盾仍未明显改善, 我国高温合金需求缺口比例从 2014 年的 35% 增加至 2023 年的 45%。替代进口是国内高温合金行业面临的首要问题之一。因此研制一材多用, 且具有更高热强性的高温合金, 对我国航空工业的发展具有重要意义^[4]。

2 GH4169 高温合金高纯、低偏析冶炼工艺

高温合金多用于高转速、高强度、高温等苛刻的环境下, 还要求具有长寿命、高可靠性, 把对材料性能和制造技术的要求规定到了极限^[5]。航空发动机 GH4169 材料被誉为“工业皇冠上的明珠”。GH4169 合金成分较多, 既有活泼的 Al、Ti、B 元素, 还有高密度的 Mo、Nb、Cr 等元素。提高高温合金纯净度的

源头就是熔炼, 但是传统冶炼方法已经不能满足其生产^[6]。目前采用的冶炼工艺有真空感应熔炼、电渣重熔、真空自耗重熔, 将上述熔炼工艺与真空感应熔炼进行组合, 可形成双联熔炼工艺 (VIM+VAR) 和三联熔炼工艺 (VIM+PESR+VAR)^[7]。双联熔炼工艺利弊共存, 当生产大型钢锭时不能满足 GH4169 高温合金的极限要求。因此学者开发出了三联熔炼工艺, 使熔炼技术达到了没有缩孔、组织致密、纯洁度高的水平, 将偏析控制到了理想范围。

目前, 关于 GH4169 合金的研究主要集中在超纯、超细化、高均质以及低偏析的熔炼技术方面。真空熔炼过程中铝钛烧损问题, 及夹杂问题成为了突破的关键技术。抚顺特钢、宝特、北京钢研院和西部超导等关于夹杂问题进行了大量的研究, 研究发现, 在真空熔炼过程中通过改变铝钛加料顺序, 增加搅拌时间, 可有效减少铝钛烧损, 提高了合金纯度和均匀度。为了减少夹杂物, 学者开发了真空级脱气炉, 主要应用于高温合金材料的熔炼制备。西安钢研不仅在加料方法方面进行了调整, 还研究了原材料和出钢温度对成分偏析的影响, 减少了 Laves 相, 极大地提高了成品合格率。

真空感应熔炼 (VIM) 技术可更有效地排出有害杂质及气体, 合金元素的收得率高, 可精确控制合金成分^[8]。强烈的感应搅拌作用, 对加速冶金反应速度、均匀成分与温度都十分有效, 低熔点、容易挥发的金属杂质 (如 Pb、Sn、Sb 等) 能挥发去除。VIM 铸锭存在缩孔、夹渣、疏松和裂纹等缺陷, 这些缺陷将会导致真空自耗的熔速、电压、电流等参数不稳定, 最终影响铸锭质量^[9]。在进行 GH4169 合金熔炼时, 应选用氧化钙坩埚, CaO 坩埚具有脱除有害元素 O 和 S 的作用。在中间包中放置陶瓷滤网可有效去除夹渣物, 净化合金, 但是容易堵包, 因此对熔炼工的技能要求较高。杨玉军^[10]等人研究了真空感应熔炼炉在冶炼高温合金时的脱氧工艺, 延长熔化期, 采用高温全熔低温精炼, 可降低氧含量, 同时, 在精炼期加入 Al、Ca 精炼 30min 可将氧含量快速降低到 10 个 ppm 以下。冯晗旭^[11]等人研究了原材料对合金夹杂物的影响, GH4169 合金夹杂物主要有氧化物 (Al, Mg, Ca) O、碳氮化物和复合夹杂物 (Ti, Nb) (C, N), 氧化物夹杂呈圆形, 碳氮化物呈不规则多边形。随着铬纯度的提高, 只有氧化物夹杂存在。

重熔精炼技术能够改善合金结晶组织, 相比于

VIM 浇注的电极, 组织更加均匀致密、纯洁度高、内应力小。在凝固过程中, 合金的液固相扩散受空间限制, 可有效避免成分偏析, 同时可以获得趋于轴向的结晶组织。气氛保护电渣重熔 (PESR) 脱 S 去 O 效率高, 可将 O、S 含量分别从 15 个 ppm、17 个 ppm 降到 3 个 ppm、4 个 ppm。王林^[12]等人研究了不同电流对电渣重熔的影响, 结果表明重熔后的夹杂物主要是 NbC 等富 Nb 夹杂相和少量 TiN, 电流增大夹杂物和 δ 相占比增加, 强度下降, 塑性增加。陈国胜^[13]研究发现氩气保护电渣重熔 (PESR) 过程中 C、Si 含量略增, Al 和 Ti 含量有烧损, 具有良好的脱 S 去 O 的效果。近几年, 关于电渣重熔工艺 C 元素的烧损问题学者进行了大量研究, 发现电极锭底部烧损最严重, 主要集中于引弧阶段, 氩气保护电渣重熔在引弧阶段易上下震动, 以及存在未排出去的氧气, 因此引气了碳化反应。

真空自耗重熔 (VAR) 没有渣池, 通过氩气加强冷却, 使熔池底部形成良好的扁平状, 晶粒的生长方向趋于轴向, 熔池温度分布更加均匀, 同时真空自耗重熔能够将一些蒸气压高的 N 和 H 去除, 不仅能够避免宏观偏析和夹杂, 还能极大降低微观偏析。刘艳梅^[14]等人研究了 GH4169 合金 VAR 铸锭中 Nb 偏析的计算, 分析了不同凝固阶段 Nb 偏聚的速度。张月红^[15]等人研究了氩气冷却强度对 VAR 铸锭铸态组织的影响, 研究表明, 低氩和高氩冷却锭中心组织呈现等轴晶特征, 鉴于二者之间的氩气强冷, 熔池变浅, 呈现人字形柱状晶。刘艳梅^[16]等人研究了 VAR 熔速对显微疏松形成规律的影响, 显微疏松从边缘到心部先减少再增多, 极冷层疏松是由喷溅物、夹杂等杂质引起的, 铸锭边部的疏松边界圆滑, 是由气泡导致的。当熔速增大时, 熔池变深, 偏析严重, 补缩通道易堵塞, 因此会导致更多的显微疏松。目前, 学者对于黑斑和白斑的形成进行了研究, 发现降低自耗熔速可减少黑斑, 减小填充比可减少白斑。

3 GH4169 合金均匀化扩散退火和热处理工艺

GH4169 高温合金中 Nb 元素含量高, 极易偏析, 负偏析形成白斑, 正偏析形成黑斑, 浇注钢锭的时候极易偏析形成 Laves 相, Laves 相过多会导致后续的自耗熔速不稳定及锻造开裂等严重问题。因此, 学者开展了均匀化扩散退火工艺研究, 消除显微偏析, 使合

金元素均匀的分布在奥氏体基体中。均匀化扩散退火温度和时间主要由 Nb 元素含量决定, 在均匀化扩散退火过程中必须防止 Laves 相液化, 在 Laves 相回溶温度范围进行长时间保温, 使 Nb 元素回溶到奥氏体基体中, 目前学者经过大量试验, 证明回溶时间不低于 30h^[17]。回溶后的均匀化温度和时间学者进行了研究, 优化了均匀化温度和时间, 使 δ 相在后续的锻造过程中均匀析出。

GH4169 高温合金的微观组织对热处理工艺具有较强的敏感性, 研究并掌握高温合金中强化相及 δ 相的固溶和析出规律具有重要意义, 根据不同的使用要求对工艺进行合理调整, 可以获得不同强度的合金工件。

GH4169 合金热处理工艺分为高温固溶处理+低温时效处理和直接时效处理两种, 根据 GH4169TTT 曲线, 固溶处理温度范围为 950~980℃, 保温 1h, 可根据 δ 相数量确定固溶温度。时效处理采用空冷双极二段时效制度。固溶处理可使强化相溶入基体, 形成单一固溶体组织。时效处理的目的是使强化相均匀、弥散析出。 δ 相溶解温度范围为 980~990℃, 析出温度为 750~960℃, 析出峰温度在 900~940℃之间, δ 相析出过多会消耗 Nb 元素, 导致 γ'' 贫化。杜金辉^[18]等人研究了热处理对 GH4169 合金组织和性能的影响, 固溶处理和时效处理不影响晶粒尺寸, 但是随固溶温度升高 δ 相析出会减少, 晶界析出 δ 相可提高蠕变抗裂能力。时效处理可控制 γ'' 和 γ' 析出, 720℃时效可析出 γ'' 强化相, 620℃时效析出 γ' 辅助强化相。 γ'' 相呈圆盘状, 平均尺寸为 20~30nm, γ' 呈球状, 平均尺寸为 10nm。田素贵^[19]研究了直接时效处理和长期时效处理对 GH4169G 合金相的影响, 研究表明, 直接时效处理合金由少量 γ'' 相、大量 γ' 相和 γ 基体组成, 长期时效处理合金相组成刚好相反。卢威^[20]研究了固溶温度和时间影响合金晶粒度、 δ 相和硬度的规律。当固溶温度 960~1020℃时, δ 相完全回溶, 静态再结晶完成, 混晶消失, 晶粒长大, 继续延长对 δ 相没有影响。固溶温度 960~975℃时, 硬度基本不变, 固溶温度 975~1020℃时, 硬度逐渐减小。谭海波^[21]等人研究了热处理工艺对合金组织和拉伸性能影响, 研究发现, 冷却速率对性能影响很小, 延长 620℃保温时间还可以继续析出强化相。

4 GH4169 合金大变形量锻造技术

δ 相数量和形态主要取决于锻造。锻造的初锻、终锻温度和变形量对 δ 相形貌、数量和晶粒均匀度有较大影响, δ 相主要有针状、短棒状、颗粒状和魏氏体状, 为了获得更多的短棒状 δ 相, 需要将终锻温度控制在 930°C 以上, δ 相溶解温度以下, 使其发生动态再结晶反应。王冠强^[22]等人、刘东^[23]等人研究发现 GH4169 合金锻件在终锻温度低、变形小的情况下会出现混晶组织, 可通过低于 δ 相的溶解温度进行再结晶热处理消除混晶组织。还有学者提出双级退火能够有效均匀细化混晶组织, 王春光^[24]等人论述了锻造和热处理对合金组织和性能的影响, 针状和短棒状的 δ 相可提高塑性、消除缺口敏感性和细化晶粒, 对晶界具有钉扎作用。近几年学者发展了 δ 相预处理技术, 同时, 提出了较小的锤击频率和较大的变形量, 增加棒材中心的应变, 采用多次墩拔和拔长工艺相结合的方法, 使变形量控制在 60% 以上, 最终达到棒材中心和边缘组织更加均匀的目的。

5 GH4169 合金焊接性能

GH4169 具有较强的抗应变时效开裂性能, 可焊接性优异, 焊接过程中, 采用不同的焊接工艺, 焊缝微裂纹、热影响区强度和接头力学性能差别很大。采用固相焊接技术能够减少焊接缺陷, 而采用熔化焊技术, 操作简单, 焊接效率更高。最常用的镍基高温合金焊接工艺有 TIG 焊接(钨极氩弧焊)和 MIG 焊(熔化极气体保护电弧焊), 近几年学者研究较多的是电子束焊(EBW)、激光束焊(LBW)和搅拌摩擦焊(FSW)等^[25, 26]。采用 GH4169 合金焊丝可进行 GTAW 电弧增材制造^[27]。

5.1 高能束焊

高能束焊包括激光焊和电子束焊, 是一种先进的焊接技术, 具有能量密度高、热影响区小、变形小、焊缝稳定可靠等优点, 广泛应用于航空航天高端制造领域。采用激光焊对 GH4169 传统轧制和增材制造板材进行焊接, 板材激光焊接接头焊缝中分布着奥氏体 γ 相、棒状 δ 相、不规则块状 laves 相、细小球状 γ' 相。增材制造板材焊接接头硬度高于传统轧制板材, 传统轧制板材焊接接头断裂在母材上, 属于韧性断裂, 增材制造板材焊接接头断裂在焊缝处, 属于脆性断裂。传统轧制板材焊接接头拉伸强度低于增材制造板材焊接接头, 但是延伸率高于增材制造板材焊接接头^[28]。

焊后热处理对焊接强度影响较大, 郭占英^[29]等人研究了热处理对激光焊接接头性能的影响, 焊后热处理可析出 δ 相, 细化 laves 相, 抗拉强度提高 52%, 硬度提高 69%, 延伸率降低 71%。近几年, 对有关焊后热处理对接头强度和硬度的影响, 以及对低温和蠕变性能的影响, 开展了大量研究^[30~32]。

GH4169 合金的电子束焊力学性能优良, 被公认为是最佳焊接技术。目前关于 GH4169 电子束焊的研究逐渐增多, 大部分学者研究重点是基本的焊缝组织、接头力学性能和机械性能等, 关于接头高温性能研究较少。张校宇^[33]等人研究了时效态 GH4169 电子束焊的接头力学性能, 试验结果表明, 焊后热处理可提高焊缝硬度, 去除余高可优化低周疲劳性能。魏祺^[34]等人研究表明 GH4169 电子束焊接头在 650°C 高温氧化环境下工作 25h, 继续拉伸性能最佳, 超过 75h 时, 机械性能将低于常温焊接接头性能, GH4169 电子束焊接头表面会形成致密的氧化膜, 可防止合金内部组织进一步氧化。有关研究表明, 固溶+时效热处理对焊接接头强度有影响。热处理后接头硬度分布均匀, 高温下强度可提高 31%^[35]。

5.2 钎焊

钎焊温度低于母材固相线, 高于钎料液相线, 母材变形小, 广泛应用于异种链接, 钎焊界面处元素扩散、钎料润湿铺展性是影响钎焊接头强度的关键因素^[36], 关于真空钎焊焊缝中心的组织和性能、微观结构和力学性能, 已有大量研究, 采用真空钎焊换热器用 GH4169 合金, 接头强度能够达到母材的 85% 以上^[37~39], 刘攀^[40]等人研究了 GH4169 合金与硬质合金刀具的异种连接, 发现镍镀层能够提高接头力学性能。张奇^[41]等人研究了钎焊接头焊后对母材的影响以及解决办法。研究发现, 960°C 保温 1h 固溶处理, 可解决缺口敏感性问题, 获得良好的焊后综合性能。学者也研究了钎焊温度对 GH4169 与 1Cr18Ni9Ti 钎焊接头组织和性能的影响, 随着温度升高, Ni 元素向扩散区扩散, 硬度没有明显变化, 钎焊温度为 1060°C 时, 钎焊接头获得最大剪切断强度, 断口发生在 1Cr18Ni9Ti 扩散区中。

5.3 搅拌摩擦焊(FSW)

搅拌摩擦焊属于固相焊接技术, 近年来在高温回转体零件的制造上发展迅速, 目前, 关于耐热钢和镍基高温合金焊接技术研究较少, 李彦默^[42]等人研究了 S31042 钢与 GH4169 合金搅拌摩擦焊技术, 研究表明, 焊缝区域发生动态再结晶, 有大量强化相析出, 因此,

焊接接头的室温力学性能优于母材 S31042 钢,焊缝中细小的晶粒和 σ 相会恶化高温蠕变性能。目前,学者对飞边形貌进行了大量的研究,白晓阳^[43]和南旭惊^[44]等人研究了“光滑”和“开裂”两种飞边形貌。同时,开展了搅拌摩擦焊模拟研究,研究了飞边开裂的影响因素^[45]。金峰^[46]等人分析了飞边成形机理,以及飞边与焊接接头性能的关系。

6 发展趋势

未来,高温合金工艺技术将向着提高承温承载能力和环境适应性能、增加高熔点合金元素含量的方向发展。其中,变形高温合金向承温更高、精密成形和低成本方向发展;铸造高温合金以高温度梯度定向凝固技术和新型、超纯单晶高温合金为未来研究重点方向。尽管国内高温合金发展速度较快,但与欧美等国相比,研究水平、设备能力、工艺技术和生产管理方面仍有很大提升空间,“两机”专项政策加速航发国产化进程,助力上游高温合金发展。《中国制造 2025》重点实施五大工程中有三大工程涉及高温合金,关注的十大领域中,航空航天装备、电力设备及新材料三大领域涉及到高温合金。预计 2022 年到 2030 年,我国累计新增 45 万吨以上高温合金市场需求量。

我国高温合金供需缺口始终保持高位,供不应求局面长期存在。近年来,我国高温合金需求量与供给量逐年同步攀升,但供需差距仍较大。2020 年,国内高温合金需求超过 5 万吨,供需缺口约达 2 万吨。从 2013 年至 2020 年,国内高温合金供给缺口占总需求量比例始终保持在 30% 以上,市场连年处于供不应求的状态。

7 结束语

综上所述,GH4169 合金在镍基高温合金中占有特殊地位。针对合金成分多样性,焊接工艺复杂性,强化相和稳定相的分布和组成对温度和时间敏感等特点,通过优化合金成分、改进冶炼方法、调整热处理工艺、提升焊接工艺来获得组织和性能优良的产品,研制具有一材多用,更高承温能力的高温合金,对我国航空航天事业的发展具有重要意义。

参考文献

- 1 谢锡善,董建新,胡尧和,等. 铁镍基高温耐蚀合金的研究与发展[J]. 世界钢铁, 2009, 9(1): 50~55
- 2 齐欢. INCONEL718(GH4169)高温合金的发展与工艺[J]. 材料工程, 2012(8): 92~100
- 3 Yang Jing, Liu Daoxin, Li Mengyao, et al. Evolution mechanism for a surface gradient nanostructure in GH4169 superalloy induced by an ultrasonic surface rolling process[J]. Materials Science & Engineering A, 2023: 879
- 4 蔡华淋,张嘉艺,齐亮,等. 时效工艺对 IC10/GH4169 异种高温合金电子束焊接接头性能及组织的影响 [J/OL]. 有色金属科学与工程, 1~12[2023-11-29]. <https://link.cnki.net/urlid/36.1311.TF.20231118.1733.002>
- 5 王绍灼,李燕,杨萍,等. 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
- 6 杨浩,王方军,李采,等. 镍基高温合金的熔炼工艺研究进展[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 1~9
- 7 Riahi S, Mckenzie J A, Sandhu S, et al. Towards net zero emissions, recovered silicon from recycling PV waste panels for silicon carbide crystal production[J]. Sustainable Materials and Technologies,2023
- 8 侯维强,孟杰,梁静静,等. 增材制造用高温合金粉末制备技术及研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(2): 131~138+144
- 9 王誉程,连利仙,邓钥丹,等. 镍基单晶高温合金熔炼工艺优化[J]. 机械工程材料, 2023, 47(3): 42~47
- 10 杨玉军,王志刚,张玉春,等. 高温合金真空感应熔炼过程中的脱氧反应[C]/中国金属学会高温材料分会. 第十二届中国高温合金年会论文集, 2011: 25~28
- 11 冯晗旭,赵连祥,刘恩泽,等. 铬对 GH4169 母合金中夹杂物的影响[J]. 材料研究学报, 2023, 37(2): 136~144
- 12 王林,高永亮,李猛,等. 电流强度对电渣重熔 GH4169 合金冶金质量的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(3): 87~92
- 13 陈国胜,周奠华,金鑫,等. 全封闭 Ar 气保护电渣重熔 GH4169 合金[J]. 特殊钢, 2004(3): 46~47
- 14 刘艳梅,孙文儒,陈国胜,等. GH4169 合金凝固过程中 Nb 偏析的计算[J]. 有色冶金设计与研究, 2017, 38(6): 54~56
- 15 张月红,王庆增,陈国胜,等. GH4169 合金板材组织性能及其与国外进口材料对比分析[C]/中国金属学会高温材料分会. 第十三届中国高温合金年会摘要文集, 2015: 37
- 16 刘艳梅,陈国胜,王庆增,等. GH4169 合金真空自耗重熔铸锭显微疏松的形成规律及熔速影响[J]. 航空材料学报, 2011, 31(4): 18~23
- 17 王庆增,田沛玉,吴令萍. GH4169 合金大型转子锻件的研制[J]. 宝钢技术, 2020(4): 47~50

- 18 杜金辉, 吕旭东, 邓群. 热处理对 GH4169 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(8): 1830~1834
- 19 田素贵, 王欣, 谢君, 等. GH4169G 合金热处理期间的相转变特征与机理分析[J]. 金属学报, 2013, 49(7): 845~852
- 20 卢威. 不同热处理制度对 GH4169 合金板材微观组织和硬度性能的影响[J]. 宝钢技术, 2018, (3): 36~42
- 21 谭海波, 孙亚利. 热处理工艺对 GH4169 高温合金锻件组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(2): 114~116+109
- 22 王冠强, 陈明松, 蔺永诚, 等. GH4169 合金锻造混晶组织的均匀细化机制与工艺[J]. 精密成形工程, 2021, 13(1): 78~83
- 23 刘东, 罗子健. GH4169 合金锻件的混晶组织[J]. 热加工工艺, 2004(9): 3~5
- 24 王春光, 王东哲, 万红, 等. 锻造及热处理工艺对 GH4169 合金组织与性能的影响[J]. 锻压技术, 2014, 39(12): 14~18
- 25 孙文儒, 陈国胜, 罗恒军, 等. 工业生产 GH4169G 合金棒材和盘锻件的组织性能[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(S2): 201~204
- 26 Lee I K, Sheu H H, Hsu H Y. The effects of graphene content on the mechanical properties and thermal conductivity of Inconel 718 superalloy brazed using BNi-2/graphene composite filler metal[J]. Results in Physics, 2019: 102828
- 27 潘宇, 吕彦明, 赵鹏, 等. GH4169 高温合金电弧增材制造焊道成形尺寸预测[J]. 机械工程材料, 2023, 47(4): 97~102
- 28 孙文君, 王善林, 谭观华, 等. 材料状态对 GH4169 高温合金激光焊接头组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 83~92
- 29 郭占英, 刘拥军, 方海鹏. 热处理对 GH4169 激光焊接头组织性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(2): 60~66
- 30 谢道彪. GH4169 高温合金对接板的组织和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007
- 31 王飞. GH4169 高温合金组织与性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2012
- 32 李胡燕. GH4169 镍基高温合金的组织和性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2014
- 33 张校宇, 卿颖, 乔雷, 等. 时效态 GH4169 合金电子束焊接接头性能研究[J]. 今日制造与升级, 2022(8): 142~144
- 34 魏祺, 敖三三, 王泰, 等. 镍基合金 GH4169 电子束焊接头高温稳定性[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(11): 2578~2585
- 35 方海鹏, 刘拥军, 张小枫, 等. 热处理对 GH4169 电子束焊接头性能的影响研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(1): 44~48
- 36 黄本生, 杨承翰, 任俊, 等. 20 钢/GH4169 固相扩散焊界面元素迁移研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(13): 63~67
- 37 韩芳明, 韩昌亮. 扩散焊温度对 GH4169 内部流道的影响规律研究[J]. 机械工程师, 2022(11): 127~129
- 38 王杰, 熊清莲, 熊宴邻, 等. 瞬间液相(TLP)扩散连接 GH4169/TC4 接头的微观结构及力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(4): 1275~1280
- 39 李卓然, 于康, 刘兵, 等. GH4169 合金真空扩散连接接头的组织和性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 13~16+113
- 40 刘攀, 钟素娟, 裴夤崑, 等. 表面镀镍对 Ag 基钎料钎焊 YG6X 与 GH4169 的影响[J]. 电焊机, 2023, 53(4): 97~102
- 41 张奇, 张慧敏, 王克尧, 等. GH4169 零件钎焊后性能恢复工艺研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(13): 50~53
- 42 李彦默, 郭小辉, 陈斌, 等. GH4169 合金与 S31042 钢线性摩擦焊接头组织及力学性能[J]. 金属学报, 2021, 57(3): 363~374
- 43 白晓阳. GH4169 镍基高温合金轴向摩擦焊接头微观组织与力学性能[D]. 济南: 山东大学, 2017
- 44 南旭惊. 旋转摩擦焊产热模型与接头成形机制数值模拟[D]. 西安: 西北工业大学, 2019
- 45 张全忠. GH4169 合金摩擦焊接过程的数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007
- 46 金峰, 熊江涛, 石俊秒, 等. GH4169 旋转摩擦焊飞边成形机理研究[J]. 材料导报, 2020, 34(10): 10144~10149