



镍基高温合金关键熔炼工艺及其质量控制策略

韩旭¹, 姚志浩¹, 杨玉军², 张睿耀¹, 董建新¹

(1 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2 抚顺特殊钢股份有限公司, 抚顺 113001)

摘要: 镍基高温合金在航空航天等领域应用广泛, 其熔炼工艺对其性能和质量至关重要。本文综述了基于 VIM、ESR、VAR 的镍基高温合金单炼、双联及三联熔炼工艺。详细分析各熔炼工艺的流程、特点、存在的缺陷及针对缺陷的研究成果, 对比不同熔炼工艺在杂质去除、元素烧损控制、缺陷产生等方面的差异, 明确各工艺的适用合金类型。结果发现, 单炼工艺 VIM 适用于对纯净度要求相对较低的合金, 双联熔炼工艺 VIM+ESR 和 VIM+VAR 分别在脱硫和控制易氧化元素烧损方面有优势, 三联熔炼工艺 VIM+ESR+VAR 则能最大程度保证合金纯净度和综合性能。然而, 镍基高温合金熔炼工艺仍面临杂质元素难以精确控制、易于产生缺陷等挑战。未来, 应聚焦于工艺参数优化、开发新型熔炼技术、缺陷形成机制及大规格铸锭性能提升方面, 为我国高温合金熔炼工艺创新发展奠定基础。

关键词: 镍基高温合金; 单炼工艺; 双联熔炼工艺; 三联熔炼工艺; 纯净度

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00097 **中图分类号:** TF142; TG132. 3

Key Smelting Processes and Quality Control Strategies of Nickel-based Superalloys

Han Xu¹, Yao Zhihao¹, Yang Yujun², Zhang Longyao¹, Dong Jianxin¹

(1 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Fushun Special Steel Shares Co., Ltd, Fushun 113001, China)

Abstract: Ni-based superalloys are widely applied in fields such as aerospace, and its melting processes are of vital importance to its properties and quality. This paper reviews the single melting, double melting, and triple melting processes of Ni-based superalloys based on Vacuum Induction Melting (VIM), Electroslag Remelting (ESR), and Vacuum Arc Remelting (VAR). The flow, characteristics, existing defects of each melting process, as well as the research achievements aimed at these defects, are analyzed in detail, and the differences among different melting processes in aspects such as impurity removal, control of element burning loss, and defect generation are compared, and the applicable alloy types for each process are clarified. The results show that the single melting process of VIM is suitable for alloys with relatively low requirements for purity, while the double melting processes of VIM+ESR and VIM+VAR have their own advantages in desulfurization and controlling the burning loss of easily oxidizable elements, respectively. The triple melting process of VIM+ESR+VAR can ensure the alloy purity. However, the melting process of Ni-based superalloys still faces challenges such as difficult to control impurity elements precisely and the tendency to generate defects. In the future, the research should focus on optimizing process parameters, developing new melting technologies, conducting in-depth studies on the defect formation mechanisms, and narrowing the performance gap of large-sized ingots compared with the international advanced level. This will lay the foundation for the innovative development of the melting processes of superalloys in China.

Key Words: Ni-based Superalloys; Single Melting Process; Double Melting Process; Triple Melting Process; Purity

镍基高温合金作为现代高端制造业的关键材料, 在 600 °C 以上承受应力的极端工况下仍能保持优异性能^[1], 其卓越的高温强度、抗氧化性、抗疲劳等特性, 成为航空航天、能源等领域不可或缺的材料^[2-4]。纯净度在性能调控中占据重要地位。夹杂物和有害元素的存在, 会严重破坏合金微观结构的均匀性, 进而降低其稳定性、力学性能、耐腐蚀性能

等。在高温服役条件下, 这些缺陷极易诱发裂纹萌生与扩展, 导致材料过早失效^[5]。因此, 实现对合金纯净度的精准控制, 优化熔炼工艺以最大程度减少缺陷, 是提升合金性能的关键所在。

经过半个多世纪发展, 镍基高温合金熔炼工艺主要包括电弧炉熔炼 (Electric Arc Furnace Melting, EAFM)、等离子感应电炉熔炼 (Plasma Induction Fur-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 52271087 和 No. 52471110)

作者简介: 韩旭 (2002—), 男, 硕士; E-mail: hanxu6761@163.com; 收稿日期: 2025-04-13

通信作者: 姚志浩 (1982—), 男, 博士, 教授; E-mail: zhihaoyao@ustb.edu.cn

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

nace Melting, PIFM)、真空感应熔炼(Vacuum Induction Melting, VIM)等单炼工艺;VIM+电渣重熔(Electroslag Remelting, ESR)、VIM+真空自耗重熔(Vacuum Arc Remelting, VAR)等双联熔炼工艺和VIM+ESR+VAR等三联熔炼工艺^[6],其中最为普遍的是双联或三联熔炼工艺。单炼工艺操作相对简单,但难以满足高性能合金对高纯净度、成分精确控制等严格要求;双联熔炼工艺巧妙结合不同熔炼方法的优势,在提升合金质量方面有一定成效;三联熔炼工艺则通过多工序协同,实现对合金成分、质量和性能的深度调控,最大限度保证合金高纯净度,但工艺复杂、生产成本偏高。

近年来,国内外学者对镍基高温合金的熔炼工艺进行了广泛探索并取得重要进展,然而,当前该领域仍面临一些亟待攻克难题。比如,杂质元素难以精确控制^[7-8]、合金元素烧损问题难以解决^[9-11]、偏析^[12-14]和斑点缺陷^[15-16]的形成机制复杂,缺乏可靠的预测与控制方法等。深入研究熔炼工艺,对提高合金纯净度及改善其性能具有重要意义。因此,本文对镍基高温合金在熔炼中的特点、缺陷问题及解决策略展开探讨,旨在为熔炼工艺的持续优化与未来研究方向提供参考依据。

1 镍基高温合金的熔炼特点

镍基高温合金因镍基体 1 455 °C 的高熔点特性,加之 Cr、Mo、Zr、Re 等合金化元素的引入调整合金体系能量状态来维持高熔点水平,从一定程度上对熔炼工艺选择提出了严格要求^[17],部分元素在镍基合金中的作用见表 1^[18]。镍基合金熔炼过程面临多重挑战,首先是高熔点导致熔体需在高温区间长时间保持液态,加剧了熔体与炉衬材料的物理化学作用,引发合金元素烧损与夹杂物生成^[19-21]。再者熔体对氢、氧、氮等气体具有较强吸附能力^[22],研究表明,在高温环境下,镍熔体中氧溶解度会急剧增

加^[23]。而水蒸气、二氧化碳等氧化性气氛则会促进氧化亚镍(NiO)生成,一氧化碳和氮气的引入也可能形成气孔等缺陷。值得注意的是,尽管镍的氧化活化能高于铁基合金,但其熔体在高温下与二氧化硫反应生成硫化镍(Ni₃S₂)倾向显著,此脆性相易沿晶界析出,严重危害材料性能^[21]。针对以上难点,现代镍基高温合金熔炼普遍采用多级工艺来协同控制。VIM 熔炼作为首炼工艺,利用真空环境有效抑制合金氧化,并通过电磁搅拌实现成分均匀化^[24];后续二次重熔 ESR 过程中,渣系在高温下形成液态渣池,通过渣-金界面反应去除硫、氧等有害元素^[25];而 VAR 重熔则利用水冷铜结晶器来控制凝固速率,抑制元素偏析并减少缩孔缺陷^[26]。工业实践也表明,真空感应炉的真空装置、电渣炉的精确控温装置以及真空自耗炉的良好冷却装置,共同实现着复杂炉气环境下对合金质量的精准控制^[21]。

2 熔炼工艺发展历程

镍基高温合金单炼工艺中目前普遍采用的是 VIM 熔炼工艺。VIM 熔炼依托的真空感应炉最早起于 20 世纪 20 年代,被用于镍铬合金的熔炼^[27-28],德国率先安装一台 4 t 容量炉子并投入工业生产^[28]。然而,第二次世界大战期间,随着真空技术的进步,VIM 熔炼才迎来实质性发展。同时,欧美及日本迅速跟进,将该技术推至实用化水平。二战结束后,尤其是 20 世纪 50 年代起,航空产业蓬勃发展,对高强度耐高温合金的需求急剧增长,VIM 熔炼更加成熟。目前,美国已有容量为 60 t 的真空感应炉^[27]。相较于国际发展进程,我国研发起步较晚,起初在苏联专家指导下,我国第一炉高温合金 GH3030 于 1956 年在抚顺特钢一炼车间开始试炼,但由于当时技术落后,该合金仅采用电弧炉制备。之后同年又进口了 2 台 10 kg 级真空感应炉^[29]。自改革开放以来,我国真空感应炉制造业迎来飞速发展,目前已

表 1 部分元素在镍基高温合金中的作用

Table 1 The role of some elements in Ni-based superalloys

合金元素	作用
Cr	固溶强化、提高抗氧化性、抵抗疲劳裂纹扩展;但过量易引发 TCP 有害相,导致合金脆化
Co	降低 Al、Ti 在基体中溶解度、促进强化相析出;但过量易使组织稳定性下降
Mo	固溶强化、提高强度和蠕变抗力;但过量可能导致氧化物形成,降低合金性能
B	提高持久性能与蠕变性能、改善晶界、晶粒细化
Al、Ti	沉淀强化、增强抗氧化性、合理 Ti/Al 比可增强耐腐蚀性;但比值过高易导致脆化
Zr	强化晶界、改善力学性能、提高抗氧化性并抵抗热裂;但过量易导致枝晶偏析
Fe	固溶强化、晶格膨胀、形成长程应力场、阻碍位错运动
Re	固溶强化、提高抗氧化性;但过量易引发偏析,形成 TCP 有害相

成功研制了近千台各种容量的炉子。例如,抚顺特钢 VIM 设备容量涵盖 3、12、20 t 等;宝钢特钢 VIM 设备容量涵盖 1、6、12 t 等。科研单位和高校实验室同样配备真空感应炉,例如,北京航空材料研究院、中国科学院金属研究所、北京科技大学等。

在 ESR 熔炼方面,美国于 1940 年率先取得电渣直接熔炼技术的专利,Kellogg 公司利用此技术生产高速钢及 Fe-16Cr-25Ni-6Mo 高温合金。而电渣重熔技术的发展则追溯至 20 世纪 50 年代,前苏联在该领域的工业化进程较领先,1958 年,乌克兰扎波洛什市的德聂泊尔地区便建立配有 4 台 0.5 t 电渣炉的电渣重熔车间;美国的菲尔思特林公司(Firth Sterling)紧随其后于 1959 年建成 3.6 t 工业级电渣炉。但此技术在欧美的全面推广直至 1965 年才真正启动。我国在电渣焊的基础上对 ESR 熔炼工艺的掌握始于 1958 年。随后于 1960 年在重庆特殊钢厂及大冶钢厂设立了电渣重熔车间^[29]。1962 年开始把 ESR 熔炼应用于生产 GH4037 合金^[30]。在随后的 70~80 年代里,该重熔工艺被各国广泛应用于熔炼冶金等多个领域。目前,德国萨尔钢厂配备的 165 t 电渣炉是国外容量最大的电渣设备^[31]。我国上海重型机器厂也曾与北京钢铁学院(现北京科技大学)合作建成 200 t 级电渣炉;抚钢安装有 1、3、15 t 等容量电渣炉;宝钢特钢有 1、15、20 t 等容量电渣炉,我国电渣炉容量正逐步扩大,但与之相关的先进技术如同轴导电、恒熔速控制等与国外相比仍有差距^[29]。

VAR 熔炼工艺专为生产钛、钴等活泼金属及钨、钼、钼等难熔金属而开发,自 20 世纪 50 年代末在美国开始应用于航空材料(包括钛及高温合金)的重熔过程^[32]。美国和西欧于 1959 至 1965 年在其与 ESR 熔炼上展开过激烈竞争,最终综合评估后得出结论:单就纯净度而言,两者相当;而在去硫及非

金属夹杂方面,VAR 熔炼不及 ESR 熔炼;在气体(N、H、O)脱除效果上,VAR 熔炼优于 ESR 熔炼。随着航空航天及燃气轮机工业快速发展,对自耗锭的直径规格要求日益严格,从 $\phi 406 \text{ mm} \rightarrow \phi 508 \text{ mm} \rightarrow \phi 660 \text{ mm}$ (GH4169) $\rightarrow \phi 810 \text{ mm}$ (GH4738、GH4698) $\rightarrow \phi 920 \text{ mm}$ (GH2706)^[29] $\rightarrow \phi 1\ 050 \text{ mm}$ (GH4169),意味着真空自耗炉需不断改进。我国于 20 世纪 60 年代初开始试制自耗炉,经多年发展,目前抚钢装有 3、18、30 t (国内吨位最大)等容量真空自耗炉;宝钢特钢有 1、6、12 t 等容量真空自耗炉;一些科研院所如中科院金属研究所等同样配备有自耗炉。但值得注意的是,国内多数 6 t 及以上的大型真空自耗炉仍依赖于国外引进。

除传统的 VIM、ESR 和 VAR 熔炼工艺以外,镍基高温合金的制备领域还涉及新型技术的应用。这些技术包括电子束熔炼(Electron Beam Melting, EBM)^[33-34]、激光增材制造(Laser Additive Manufacturing, LAM)^[35]、粉末冶金(Powder Metallurgy, PM)^[36],以及定向凝固(Directional Solidification, DS)^[37-38]等,新技术的引入不仅为提升镍基高温合金的纯净度开辟了新路径,还致力于进一步优化合金组织结构与综合性能。

结合以上内容,总结了国内外熔炼工艺的发展历程,如图 1 所示。

3 熔炼工艺方法及其质量控制

3.1 单炼工艺(VIM)

VIM 熔炼源于感应加热技术。其原理遵循电磁感应、集肤效应和热传导三个基本原则。即在真空下,利用磁性较好的金属导体通过电磁感应获取感应电流,当电流以一定频率变化时,便产生感应磁场,这时导体由于磁场作用而在自身内部产生涡

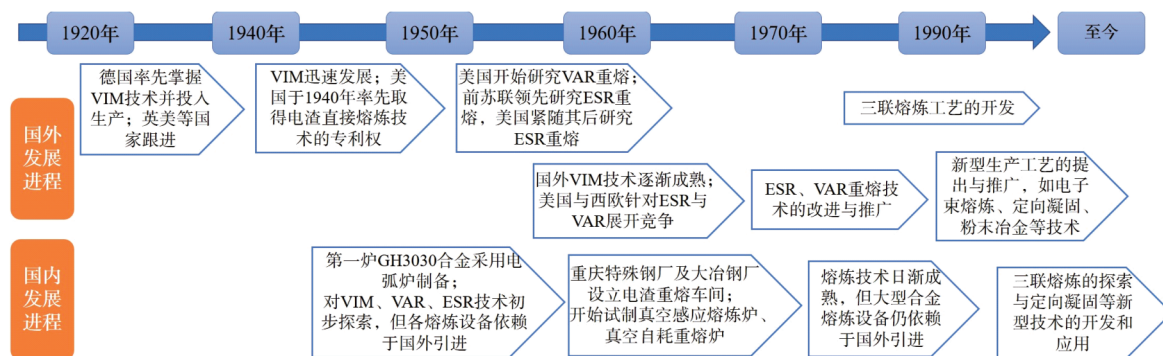


图 1 国内外熔炼工艺的发展历程

Fig. 1 The development of smelting process at home and abroad

流,涡流通过电阻热效应进而产生热量,使金属迅速升温。图2展示了VIM熔炼设备^[39]及工艺流程的示意图。

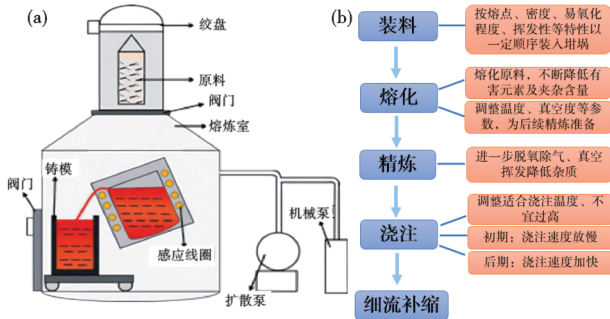


图2 VIM熔炼工艺示意图:(a)熔炼设备,(b)工艺流程
Fig. 2 Schematic diagram of vacuum induction melting (VIM) process: (a) melting equipment, (b) process flow

该工艺具备如下特性:(1)由于除装料外的步骤均在真空下进行,因此,避免了金属液与气体反应而导致的污染问题。(2)碳元素具备强脱氧能力,其产物CO被抽离至系统外部,降低了因脱氧产物残留于熔体中造成的污染。(3)能够对合金化学成分精确控制,特别是Al、Ti及Zr等元素,其含量可被控制在极窄波动范围内。(4)合金内气体成分及低熔点有害杂质元素,在熔炼中得以部分蒸发或通过炉渣去除。然而,该工艺亦存在局限性,包括在高温下熔体与耐火材料坩埚之间发生反应、脱硫难度较大,以及所制备铸锭内部可能存在疏松、缩孔、夹杂等^[40-41]。

众多学者对VIM熔炼存在的各类局限进行研究力求寻找解决方案。

1)S的脱除。S在高温合金中以杂质元素存在,形成的夹杂物往往成为疲劳裂纹萌生和扩展的通道,对整体性能产生负面影响^[42-43]。

Zhang等^[44]在CaO坩埚熔炼中分析一种镍基高温合金内 $w[S]$ 变化,发现虽然CaO能够与硫反应生成CaS,但脱硫效果有限, $w[S]$ 仅从0.0024%降至0.0016%左右。而添加 $w[Al]$ 为0.6%后, $w[S]$ 进一步降至0.0005%以下。同时,Utada等^[45]也发现CaO坩埚确实能够降低 $w[S]$,但CaO会与Al反应生成三钙铝酸盐($Ca_3Al_2O_6$)导致 $w[Al]$ 减少,可能降低合金的蠕变性能。为进一步揭示脱硫机制,Kishimoto等^[46-47]开展CaO坩埚在1400~1600℃下对含Al镍基合金的脱硫实验,脱硫机理如图3所示。合金内Al和S元素与CaO发生反应,在CaO表面生成CaS

和 Al_2O_3 。而 Al_2O_3 与CaO会进一步结合形成液态炉渣,通过大量捕获CaS使硫脱除。且此炉渣还可能促进精炼反应而加快脱硫效率。Horie等^[48]的研究还发现在CaO中加入适量MgO比单独CaO坩埚具有更高脱硫率。稀土元素也有助于脱硫^[49],Lin等^[50]研究熔炼中稀土氧化物对CaO坩埚脱硫的影响,确定了脱硫的中间产物为 $Ca_xRE_yAl_zO_m$ 。Fan等^[51]对CaO- Y_2O_3 复合体系与熔体间的界面反应机制进行研究,发现了脱硫过程的界面分层现象,这为后续开发更高效脱硫和稀土元素控制技术提供了重要参考。

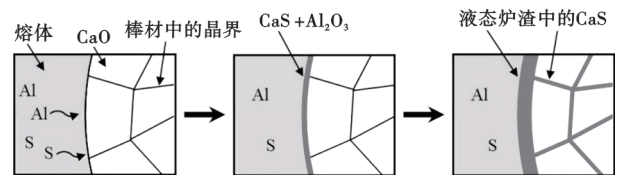


图3 含Al镍基高温合金脱硫机理图

Fig. 3 Desulfurization mechanism diagram of Ni-based superalloy containing Al

2)O的脱除。O在镍基高温合金中主要以微量杂质形式存在,主要包括固溶态和氧化物夹杂两种。固溶态氧对合金性能影响较小,而氧化物夹杂则常常成为疲劳裂纹的萌生点和扩展通道,对合金持久强度、蠕变等关键性能产生负面影响^[52-53]。

在CaO坩埚熔炼方面,李清华等^[53]探究熔炼时的脱氧效果时发现,采用较长熔化期对脱氧过程有利。当向合金中添加 $w[C]$ 为0.02%时,可提高熔化期的氧脱除效率;加入 $w[Al]$ 为0.5%时可再次促进脱氧反应,最终在适当精炼时间后,合金中 $w[O]$ 降至低于0.0006%。针对上述脱氧现象,王国全等^[54]进一步探究碳和铝元素在脱氧中的机理。发现在合金液中碳与氧的反应可表示为 $[C]_{Ni} + [O]_{Ni} = CO \uparrow$,而铝与氧的反应则可表示为 $2[Al]_{Ni} + 3[O]_{Ni} = Al_2O_3$ 。而铝脱氧中还会在CaO坩埚壁形成低熔点 $3CaO \cdot Al_2O_3$ 渣而进一步促进脱氧。在MgO坩埚熔炼方面,杨玉军等^[55]研究C、Al、Ca等元素在MgO坩埚熔炼时的脱氧反应。发现通过C、Al、Ca等元素的综合作用,可将合金中的 $w[O]$ 快速降至0.001%以下,这一发现为元素与脱氧工艺的结合提供了新思路。近年来,随着对合金纯净度要求的不断提高,学者们致力于通过调整工艺参数来减少杂质氧,通过不断调整熔化时间^[56-57]、真空度^[58-59]、C初始加入

量^[60]等条件控制 $w[\text{O}]$, 确定最佳参数范围而生产出高纯净度镍基高温合金。

3) N 的脱除。N 在镍基高温合金中主要以溶解态、氮化物或碳氮化物形式存在。当合金中 $w[\text{N}]$ 超出 TiN 在固相线温度下的饱和溶解度时, 会形成粗大 TiN 夹杂。其含量有时会高出氧化物夹杂一个数量级, 从而对合金力学性能产生严重影响^[61-62]。

脱氮的首选坩埚通常是 CaO 坩埚, 其在高温下与氮反应生成氮化钙 (Ca_3N_2) 而具备强脱氮能力^[63]。在工艺参数方面, 真空度、精炼温度和时间对氮脱除有重要影响。王旻等^[64]对高 Cr 镍基高温合金的脱氮热力学研究, 发现氮在合金中的平衡溶解度较高且主要受真空压力控制。李清华等^[65]调整真空压力时发现, 在 0.1 Pa 条件下可将 $w[\text{N}]$ 从 0.000 5% 降至 0.000 1%, 而在 6~19 Pa 时 $w[\text{N}]$ 只能降至 0.000 3%, 结合以上分析提高真空度是降低熔体中 $w[\text{N}]$ 的有效措施。精炼温度与时间需合理设置, 通常精炼温度在 1 500 °C 左右能使耐火材料中的氮等杂质元素进入合金液最少^[66]; 长精炼时间有利于降低气体含量, 但过长易使合金与坩埚发生有害反应而降低纯净度^[67]。电磁搅拌对氮分布也有一定作用, Wang 等^[68]在 IN718 合金脱氮的数值模拟中发现, 电磁搅拌能加速氮传质速率, 且增加电流强度和降低熔炼压力均能有效降低氮在熔体中的溶解度, 如图 4 所示。Qian 等^[69]进一步研究不同搅拌强度的脱氮机制, 发现在高速搅拌下, 脱氮过程受液相质量传递和气-液界面反应混合控制; 而在低速搅拌下主要受气-液界面化学反应控制。

脱氮机理方面, 目前普遍认可的脱氮过程是氮原子扩散至熔体表面、界面反应生成 N_2 及 N_2 扩散至气相。此过程通常在不同条件下符合一级即扩散反应、二级即界面化学反应或两者混合的规律^[66]。

随着模拟技术的发展, 脱氮反应模型正不断改进, Zhao 等^[70]提出的多物理场模型, 通过模拟电磁场、流场及温度场的作用来分析熔池内的氮传质机理, 显著提高了脱氮动力学的预测精度。但在脱氮热力学方面, 目前的大量模拟多停留于铁基合金^[71-73], 如 Wang 等^[74]在脱氮计算中所参考的参数多是铁基合金数据, 这将导致计算结果与实际有较大偏差。因此, 未来建立适合镍基合金的热力学数据显得尤为重要。

4) 凝固缩孔消除。缩孔疏松常出现于合金液经过浇注得到的感应锭中, 主要由凝固时熔体补缩不足导致^[75]。早期研究对合金成分^[76]、浇注工艺^[77]、冒口^[78]等因素的作用进行过探讨并取得一些成果, 但作为直接影响熔体流动性与补缩能力的浇注温度等参数却少有提及, 主要源于浇注过程的复杂物理机制导致研究难度大^[79-80]。但近年来数值模拟的兴起使此问题得到一定解决。如 Zhang 等^[81]通过模拟建立多维模型来优化浇注参数, 指出浇注温度 1 450 °C、浇注时间 14 s 时缩孔率最小。但值得注意的是, 仅 VIM 熔炼的合金缩孔、偏析等缺陷仍不少存在。

可见, 众多学者针对 VIM 熔炼工艺在 S、O、N 等杂质元素消除与缺陷控制方面展开了研究并取得重要成果。然而, 该工艺在高温下熔体易与坩埚反应、某些杂质含量依然偏高及缩孔偏析缺陷仍普遍存在等问题, 始终未能得到有效解决。在此背景下, 双联熔炼工艺应运而生。

3.2 双联熔炼工艺

为满足更高纯净度要求, 联合熔炼成为镍基高温合金生产的主导方式。在此过程中, 一次熔炼旨在精确获取合金所需的化学成分, 而二次重熔则着

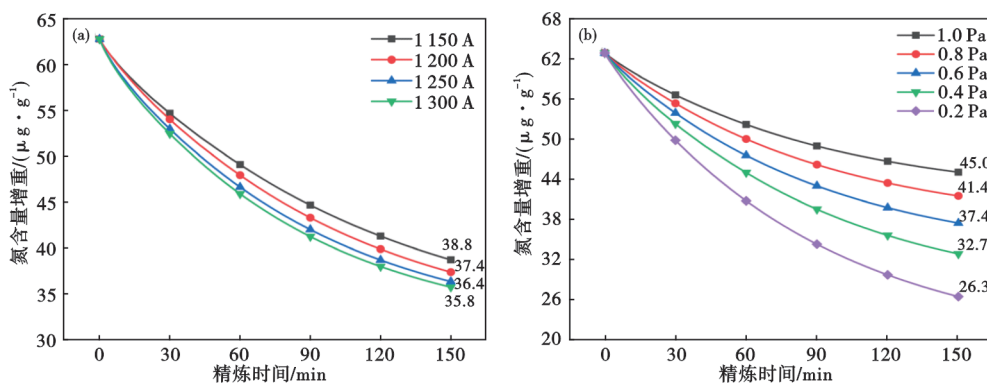


图 4 不同参数下氮含量增重情况: (a) 电流强度, (b) 熔炼压力

Fig. 4 Nitrogen content increase under different parameters: (a) current intensity, (b) melting pressure

重进一步减少气体与夹杂含量。以下将重点介绍VIM+ESR和VIM+VAR两种双联熔炼工艺。

3.2.1 真空感应熔炼+电渣重熔双联熔炼工艺(VIM+ESR)

ESR熔炼的核心是利用电流通过熔渣时产生的电阻热为热源来熔炼金属及其合金。在渣池的加热下,电极端部逐渐熔化形成熔滴,随后经渣池进入金属熔池。熔渣与渣池较高的温度及电磁搅拌作用,为熔渣与熔体的充分接触提供了良好的热力学与动力学条件。最后通过结合化学精炼与控制凝固技术,生产出高品质铸锭。图5展示了ESR熔炼设备^[39]及工艺流程的示意图。

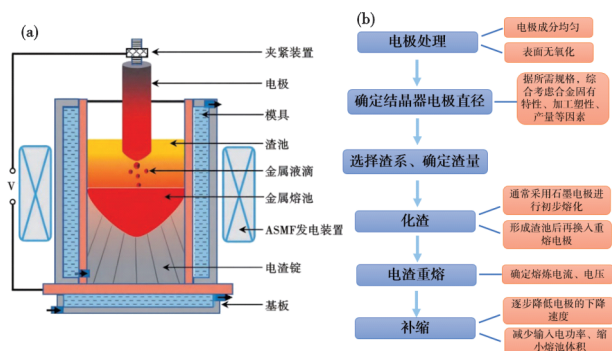


图5 ESR熔炼工艺示意图:(a)熔炼设备,(b)工艺流程
Fig. 5 Schematic diagram of electroslag remelting (ESR) process: (a) melting equipment, (b) process flow

ESR熔炼具备以下特点:(1)脱硫效果好,脱硫方式主要有三种:熔渣脱硫、气化脱硫和电化学反应脱硫^[25]。有研究发现熔炼中的 CeO_2 熔渣有极高的脱硫效率,脱硫率可达约90%^[82]。(2)去除气体和夹杂物。由于熔炼设备良好的结晶条件,使再生夹杂的尺寸细小、分布均匀,硫化物夹杂的形态与分布也明显改善,但除氢效果差,所以必须选择合适的熔渣成分控制氢的来源^[83]。

结合ESR熔炼特点看,在VIM基础上进行ESR熔炼可发挥两者的优点以精炼合金,从而呈现更高纯净度。但化学成分难以精确控制和对熔渣要求高是ESR熔炼中的主要挑战^[23, 84]。若熔渣中含有氧化铁、氧化硅等不稳定氧化物时,将导致Al、Ti等元素的烧损。因此,如何精确调控合金中Al、Ti元素含量,成为ESR熔炼时需重点关注的核心问题。

学者们集中在渣系选择、参数调整、工艺改进三个方面解决Al、Ti烧损问题。

1)渣系选择方面。Tan等^[85]探究渣系中具体成

分对Al、Ti含量的影响排序,指出增强Al损失的渣依次为 $\text{SiO}_2 > \text{FeO} > \text{TiO}_2 > \text{CaF}_2 > \text{MgO}$;而增强Ti损失的为 $\text{FeO} > \text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO}$ 。邢宝富等^[86]在重熔GH4033合金中发现,采用由 CaF_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 组成的四元渣系可降低Ti元素烧损且加入约3.4% TiO_2 粉可再次降低烧损量。Hou等^[87]建立热力学模型分析渣-金属多相反应来优化 CaF_2 : CaO : MgO : Al_2O_3 : $\text{TiO}_2=47:25:3:(25-x):x$ 渣系时发现,当 $x=10$ 即 $w[\text{TiO}_2]$ 为10%时,该渣系的熔化温度最低而利于平衡Al、Ti烧损并降低O、S含量,也保证了铸锭表面光滑。巨建涛等^[88]在IN825合金低氟渣系的研究中提出Al、Ti含量差异对氧化行为的影响。当两者含量差异较大时,Ti元素易被氧化;而较小时,Al元素易被氧化。Shen等^[9]还建立了GH4706合金的 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-FeO-SiO}_2$ 渣系模型,使Al、Ti烧损量降低至10%以下且成功用于工业试验。因此,结合以上分析,在实际生产中需合理设计渣系以控制Ti/Al比满足要求。

2)工艺参数方面。李乐松等^[89]研究GH4169D合金在不同熔炼温度下Al、Ti元素烧损特点,发现Al烧损程度与温度呈负相关,Ti则呈正相关,这一发现与Duan等^[90]在探究IN718合金重熔中Al、Ti的氧化行为相契合,进一步验证了不同条件下元素烧损规律的相似性。Li等^[91]还在重熔IN718plus合金中提出了温度参数与渣系成分的协同效应,发现高温下提高 $w[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 和 $w[\text{CaO}]$ 可减少Al烧损;低温下提高 $w[\text{TiO}_2]$ 可减少Ti烧损。未来ESR熔炼中Ti、Al烧损控制研究将聚焦于多功能渣系与温度的精细协调。

3)技术改进方面。在原基础上还逐步发展出一些新型重熔技术,包括保护气氛电渣重熔(Protective Atmosphere Electroslag Remelting, PESR)、真空电渣重熔(Vacuum Electroslag Remelting, VESR)、电渣快速重熔(Electroslag Rapid Remelting, ESRR)等,新型技术的应用以期提升电渣锭质量及缩减成本^[92-93]。

目前阶段,VIM+PESR熔炼相较于VIM+ESR熔炼展现出更大优势,主要归因于ESR熔炼常直接暴露于大气中,易导致 O_2 引入及易氧化元素烧损问题^[39, 94]。因此,需采用惰性气体如氩气作为保护气氛^[95]。陈韩锋等^[96]聚焦于PESR熔炼下GH4169合金的冶金质量研究,结果见表2、表3,可看出相较于非保护气氛,VIM+PESR熔炼下电渣锭在C、Al、Ti等

元素的收得率、均匀性分布及脱氧效果方面均有提升,然而脱硫率却略有下降。赵子民等^[97]则采取加装全密闭气氛保护罩的方式对电渣炉改造。发现改造后的 Ti 元素收得率高达 96%(原始状态下为 88%),该措施有效缓解了元素严重烧损问题及锭头尾部位分布不均的现象。

可见在 VIM+PESR 熔炼下,镍基高温合金正呈现更具特色的优势。但随着合金质量和性能要求的不断提高,电渣重熔还需不断升级,最终目标是更高洁净度和更高生产效率。PESR 正逐步向 VESR 发展,即真空代替惰性气体进行熔炼,做到零氧化^[93, 98-100],这也有利于减少 O₂、N₂ 等气体的污染。而国外关于此技术的公开资料有限,我国正逐步突破该领域的技术封锁,并已成功研制出首台用于生产的 2 t 真空电渣炉^[101-102],但掌握程度较不成熟,未来仍需加大投入与研究。

此外,ESR 熔炼的镍基高温合金普遍存在偏析问题,甚至比 VAR 熔炼更严重,主要是源于其通常以电阻热去熔化电极,使熔炼时热传导率低,与 VAR 熔炼相比产生更深熔池和更长凝固时间进而加剧偏析^[103],因此,对于元素含量偏高,凝固时两相区温度范围宽的合金不再适合 ESR 熔炼^[104]。大多学者针对偏析多集中于 VAR 熔炼研究,但也有学者对 ESR 熔炼的偏析缺陷提出一些解决策略。石晓^[104]指出适当降低重熔电流有利于缓解偏析,但过低又易发生吸氮、吸氧现象。Manikandan 等^[105]研究 IN718 合金时发现增大冷却速度可抑制 Laves 相形成而减弱偏析。Liu 等^[106]、Medovar 等^[107]、Dong 等^[108]均提出通过采用单电源双回路的抽锭式新型电渣重熔设备,能使熔池趋于浅平化以减弱偏析。结合以上分析,选择何种工艺需综合考虑合金特性且如何做到元素控制与偏析消除的协调还有待研究。

3.2.2 真空感应熔炼+真空自耗重熔双联熔炼工艺(VIM+VAR)

VAR 熔炼原理是将一次熔炼的母合金锭作为重熔电极,在燃弧过程中,电极以一定速率熔化并

得到精炼,同时,受水冷铜结晶器强制冷却作用,铸锭顺序凝固,从而改善铸锭结晶结构。此工艺创造出一种低氧的熔炼条件,有效降低了易氧化元素的烧损且偏析缺陷也有所改善。图 6 展示了 VAR 熔炼设备^[39]及工艺流程的示意图。

结合 VAR 熔炼过程看,VIM+VAR 双真空熔炼工艺相较于 VIM 单炼工艺具有更好除杂除气能力。但 VAR 熔炼也有自身的两大局限,一是偏析问题^[12, 13, 109-111],包括宏观偏析和微观偏析,在镍基高温合金中宏观偏析易表现为点状偏析,微观偏析易表现为枝晶偏析,两种偏析均对合金性能不利,且均匀化及热加工过程后难以完全消除。二是斑点问题^[112-114],同样严重影响合金性能,特别是当周围聚集夹杂物时危害更大。斑点分为白斑和黑斑。白斑中的溶质元素贫化,腐蚀表面呈亮白色,晶粒比基体粗大。根据形状、特点和形成原因可分为分离状白斑、树枝状白斑和凝固白斑^[115]。图 7 展示了一种高温合金中枝晶白斑的典型宏观形貌^[116]。而黑斑则是在横截面上以深褐色侵蚀斑点出现,本质上属于宏观偏析,组织一般为等轴晶^[116]。斑点缺陷在合金中的形成机制与来源复杂,这类缺陷是当前国内外高温合金领域关注度最高的冶金缺陷之一^[117]。

学者们通常通过控制 VAR 熔炼的两大参数来探讨偏析问题。

1) 熔化速率。熔化速率作为 VAR 熔炼的一个关键参数,对铸锭的偏析行为有显著影响。赵雅婷等^[118]利用元素平衡分配计算探究宏观偏析时发现,当熔速过高时,合金中出现由富 Ti、C 的一次碳化物和富 Ti、Cr、W 的 Laves 相组成的“点偏区域”。王资兴等^[119]则在 IN718 合金自耗锭中发现,一次枝晶在合金边缘更密集,而二次枝晶在中心更密集且间距相较半径 R/2 处略有增加。随熔速提高,中心与 R/2 区域的二次枝晶间距均增大。而熔速过高,两区域又出现二次枝晶干粗化甚至熔合现象。相关研究还表明适当降低熔速有利于减少疏松和夹杂的数

表 2 不同条件下电渣重熔 GH4169 部分元素含量变化情况

Table 2 Changes of some elements in ESR GH4169 under different conditions

取样位置	检测部位	w[C]/%	w[Al]/%	w[Ti]/%	Al 收得率/%	Ti 收得率/%
VIM 电极棒	—	0.043	0.71	1.02	—	—
非保护气氛	头部	0.039	0.45	0.84	63.38	82.35
	尾部	0.036	0.39	0.79	54.93	77.45
氩气保护	头部	0.044	0.57	1.01	80.28	99.02
	尾部	0.043	0.55	0.99	77.46	97.06

表3 不同条件下电渣重熔S元素含量变化

Table 3 Changes of S element content in ESR under different conditions

取样位置	$w[S]/10^{-6}$
VIM 电极棒	13
非保护气氛	9
氩气保护	11

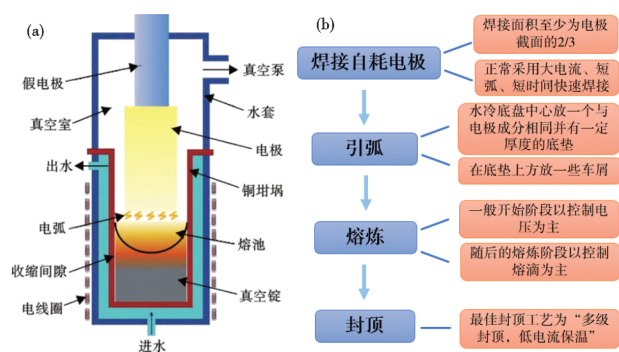


图6 VAR熔炼工艺示意图:(a)熔炼设备,(b)工艺流程

Fig. 6 Schematic diagram of vacuum arc remelting (VAR) process: (a) melting equipment, (b) process flow

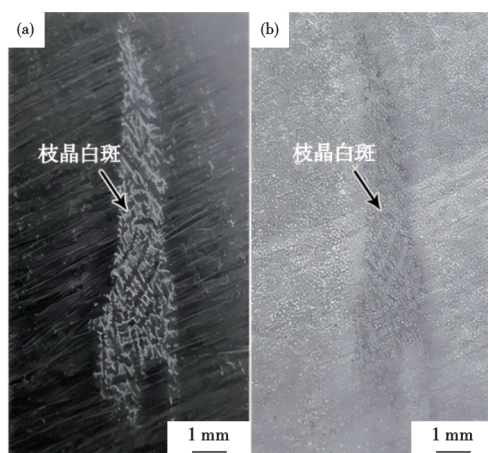


图7 一种高温合金盘锻件上白斑缺陷的典型宏观形貌:(a)抛光,(b)腐蚀

Fig. 7 Typical macro-morphology of white spot defect on a superalloy disk forging: (a) polished, (b) etched

量^[120-121]。然而,熔速也不宜过低,Zhao等^[122]的研究指出,过低的熔速会降低熔池流动性,使低密度夹杂难以通过浮力上浮至熔池表面被排除,反而可能在铸锭内聚集。因此,结合以上分析,中等熔速条件对提高高温合金质量较为良好。

2)冷却速率。随着航天事业的迅速发展,自耗锭直径日益增大,冷却速率控制同样受到较多关注。Cui等^[111]考虑水冷坩埚对合金铸锭内部电磁场的影响,建立了用于宏观偏析缺陷的预测模型,为

理解铸锭内部偏析提供了新视角。Patel等^[123]在IN718合金不同冷却速率下的微观组织研究中发现,随冷却速率降低,二次枝晶臂间距逐渐增大,枝晶间液相中的溶质分离现象也更明显。Nawrocki等^[124]则通过建立不同直径IN713C试样的二次枝晶间距与冷却速率的函数模型,发现冷却速率越高,铸造得到的直径越小,晶粒细化效果越显著,枝晶偏析明显改善;并强调模具温度是影响冷却速率的重要因素。黄科杰等^[125]探究不同冷却速率对GH4151合金元素偏析的影响规律。如图8与表4所示,发现无论是一次还是二次枝晶,其间距均随冷却速率增加而减小,枝干与枝间 γ' 相尺寸也呈现类似趋势,组织均匀性随高冷却速率得以提升。结合以上分析提高冷却速率有利于减轻偏析。在具体措施上,国内外学者均认为在铸锭和结晶器间引入导热性良好的气体如氩气,可提高热提取率使熔池深度减小,进而降低偏析程度,使成分分布更均匀^[122, 126-127]。

鉴于斑点问题在国内外备受关注,以下将对其展开深入探讨。

1)白斑。白斑的形成源于真空感应电极冶金质量欠佳及VAR熔炼过程的不匹配。这种现象使熔炼时电弧稳定性遭到破坏,进而导致非金属漂浮物、锭冠、喷溅物和掉块等落入熔池。由于在糊状区这些物质来不及完全熔化,最终形成白斑。图9展示了白斑的具体形成方式和落入熔池的路径^[115],可以看出白斑形成途径多样,锭冠、喷溅物和掉块的掉落路径也各不相同。在VAR熔炼中,任何环节控制稍有疏忽,都极有可能产生白斑。

Grignard等^[114]在IN718合金的研究中发现,白斑可能源自冠部、架部及电极环等位置,其中,冠部因下落时间短、初始温度低及合金元素(尤其是Nb)贫化成为其形成的重要来源。谭海兵等^[16]则在GH4586合金的白斑组织特征分析中发现,白斑以枝晶白斑形式存在,微观组织由MC型碳化物、 M_6C 型碳化物及大尺寸非共格 γ' 相组成的第二相团簇构成。指出白斑的形成源于电极本身的内应力和缩孔导致的开裂、掉块行为。李思彤^[128]在GH4169合金的白斑研究中发现,铸锭中白斑属于枝晶白斑和块状白斑,白斑部位存在晶粒长大现象,且 δ 相发生缺失。并指出其形成原因源于熔炼工艺不当、偏弧、弧长过长以及裂纹/缩孔中的气体等。综合以上学者的研究成果,可以看出,提高自耗电电极质量及

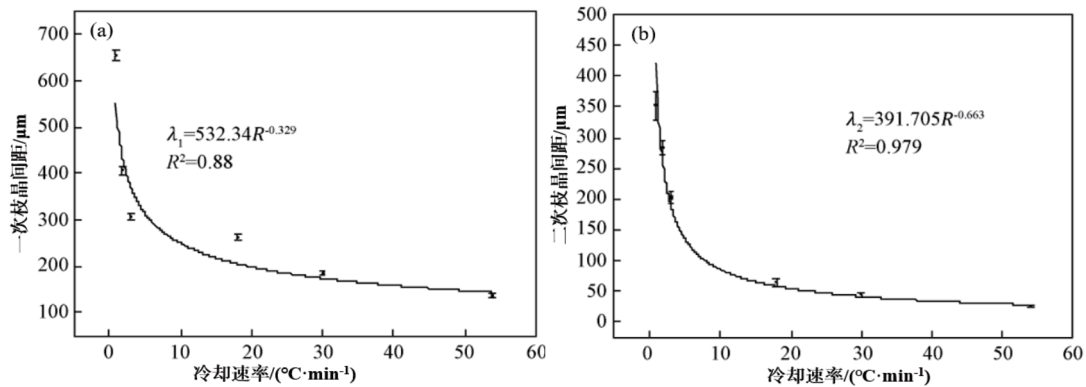


图 8 不同冷却速率下的平均枝晶间距: (a)一次枝晶间距, (b)二次枝晶间距

Fig. 8 Average dendrite spacing at different cooling rates : (a) primary dendrite spacing, (b) secondary dendrite spacing

表 4 不同冷却速率下枝干与枝间 γ' 相的尺寸

Table 4 Size of γ' phase in the dendrite arms and interdendritic at different cooling rates

冷却速率/(°C·min ⁻¹)	枝干中 γ' 相尺寸/nm	枝间中 γ' 相尺寸/nm
0.9	159.07	267.15
3	130.91	206.50
54	105.44	187.04

优化 VAR 熔炼过程是控制白斑的有效措施。

(2) 黑斑。黑斑是一种宏观通道偏析现象。在合金凝固过程中两相区内, 枝晶生长时会将部分溶质元素如 Ti、Nb、B 等排入枝晶间的残余熔体中, 这将导致富集溶质元素的熔体与正常熔体形成密度差, 进而产生流动。当熔化速度较快、熔池较深, 且凝固速度较缓慢时, 富集溶质元素的熔体在凝固后便形成黑斑^[116]。图 10 展示了一种镍基高温合金黑斑形成的示意图^[129], 可以看出, 糊状区液体对流引起的部分枝晶碎片流至试样边缘, 由于边缘与内部的散热条件差异, 边缘处的冷却速率明显高于内部。

在此情况下, 受垂直对流作用, 到达边缘的碎片在重力影响下逐渐凝固形成黑斑。同时, 另一部分碎片在到达边缘前在对流通道中凝固形成倾斜黑斑。

Wang 等^[130]在 IN718 合金熔炼时的工艺参数对黑斑影响中发现, 当电极直径减小或弧隙变化时, 会导致熔池深度增加而改变电流分布, 使凝固过程更不稳定, 进而形成黑斑。代朋超等^[131]则在一种镍基高温合金黑斑形成机理研究中发现, 黑斑主要由富 Ti 的碳化物严重偏析造成, 结合热力学计算指出 Ti 与 C 在液态下不同程度的偏聚行为是造成黑斑富集的原因。李桐等^[132]对 IN718 合金的黑斑数值模拟中发现, 黑斑易在凝固早期形成, 且熔化速率越快, 黑斑数量便越多。Wang 等^[133]在 GH4065 合金的研究中指出, 降低 VAR 熔炼的熔化速率、加快冷却速率可减少黑斑形成率。国外学者还在 VAR 熔炼中黑斑的预测准则与检测方面进行过探索。Auburtin 等^[134]通过对一种镍基高温合金进行凝固实验来研究不同凝固界面角度下的黑斑形成情况, 并基于

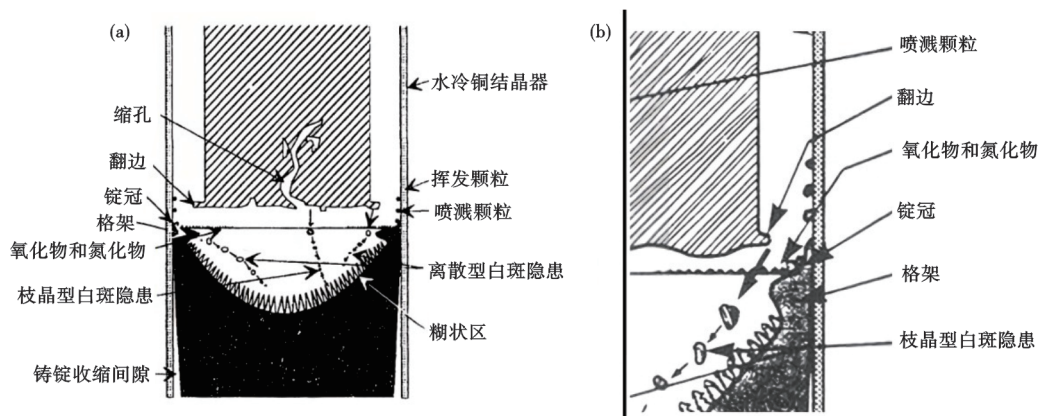


图 9 (a)白斑形成的方式及(b)落入熔池的方式和路径

Fig. 9 The formation mode of white spots (a) and the way and path of falling into the molten pool (b)

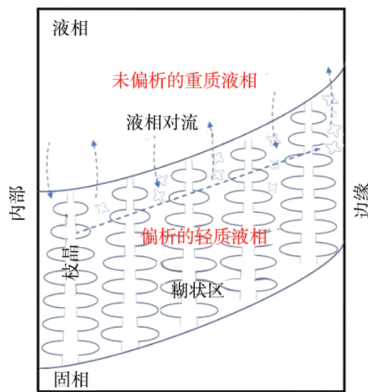


图10 黑斑形成示意图

Fig. 10 Schematic diagram of freckles formation

传统 Rayleigh 判据发现,黑斑的形成与凝固界面角度相关。在此基础上充分考虑方向渗透性后提出修正的 Rayleigh 判据,可用于评估不同凝固条件下的黑斑形成倾向。Valdés 等^[135]也对 Rayleigh 判据进行修正,并提出倾斜凝固界面影响下的最大局部 Rayleigh 数黑斑预测准则。此准则保留了渗透率张量的各向异性,从而能够较好分离有无黑斑的试验情况。最大 Rayleigh 数与黑斑形成的关系如图 11 所示^[135],Rayleigh 数的临界值接近 0.2,低于此值通常不会出现黑斑。同样指出,倾斜凝固界面会增加黑斑形成率。Böttger 等^[136]进一步考虑熔池的几何形状、糊状区的渗透性、熔体的密度梯度以及凝固速率提出一种基于熔池中熔体瞬时流动的新判据,通过计算熔池中非等温流动分量而准确预测黑斑形成情况。Genereux 等^[137]在高强度镍基高温合金的黑斑表征中发现,黑斑与基体密度相似使超声波难以探测;而在宏观蚀刻中,蚀刻剂(HCl+H₂O₂)虽可有效增强对比度,但此方法在实际生产中却难以广泛应用,因此,黑斑检测在工业中仍面临较大挑战。

可见偏析与斑点缺陷始终是制约 VIM+VAR 熔炼镍基高温合金性能提升的关键问题。根据合金特点选取恰当工艺参数,并提高自耗电极质量,已成为净化熔炼的重要基础。近年来该方向的发展趋势显著,自动控制系统、数值模拟技术等先进手段的应用日益广泛^[113, 126, 138]。

3.3 三联熔炼工艺(VIM+ESR+VAR)

针对镍基高温合金对纯净度要求的不断提升,双联熔炼工艺固有的局限而难以满足大规格合金的需求,进而推动了三联熔炼工艺的发展。三联熔炼工艺包括正三联(VIM+ESR+VAR)和倒三联(VIM+VAR+ESR),然而倒三联熔炼工艺在工业中

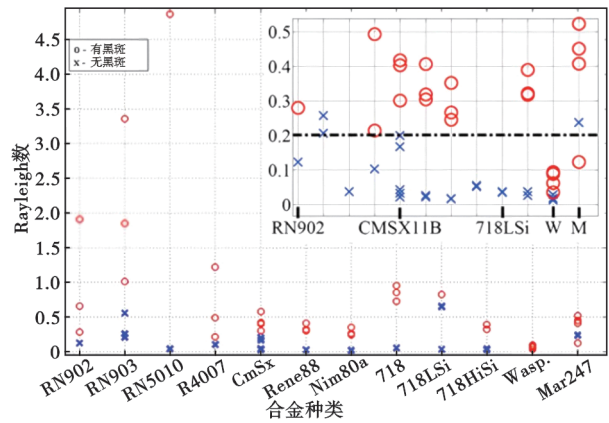


图11 最大 Rayleigh 数与黑斑形成的关系

Fig. 11 Relationship between maximum Rayleigh number and freckle formation

使用较少。有关研究^[139]通过对比 ESR 和 VAR 发现,相较于 VAR 熔炼,ESR 熔炼展现出更高热惯性,其更易控制进而有效避免温度波动。所以,经改进的 ESR 熔炼在可靠性上有望超越 VAR 熔炼。据此三联熔炼工艺普遍遵循先 ESR 熔炼后 VAR 熔炼的过程,这样即可将 ESR 熔炼中去除杂质和 VAR 熔炼中降低氧化烧损的优点充分结合。国际变形高温合金界也广泛认可三联熔炼工艺的优越性。美国的 GE 和 PW、英国的 RR、法国的 SNECMA、德国的 MTU、日本的 NIMS 等知名航空公司与研究机构,均认同三联熔炼工艺是实现变形高温合金具备长寿命与高可靠性的基础^[29]。

目前,三联熔炼工艺因生产的合金质量更加可靠已吸引国内外众多学者关注。国外对 IN718 合金研究较多, Moyer 等^[140]的研究发现,相较于 VIM+VAR 双联熔炼工艺,三联熔炼工艺生产的 IN718 合金更洁净且性能更稳定,其超声检测信号较双联熔炼工艺减少约一个数量级,黑/白斑缺陷也有所减少。随着对热稳定性能需求的不断提升,IN718 合金正逐步向性能更优的 IN718plus 合金发展^[141-142]。而我国应用较广泛的 GH4169 合金(仿美 IN718 合金)和 GH4738 合金在三联熔炼工艺上也颇有进展,陈国胜等^[143]对采用 VIM+PESR+VAR 工艺与 VIM+VAR 工艺生产的 GH4169 合金进行对比发现,三联熔炼工艺中 PESR 制作的电极无缩孔且纯度高,使 VAR 熔炼过程更稳定,宏观缺陷产生率大幅下降。杜金辉等^[144]同样指出,三联熔炼工艺的突破提高了 GH4169 合金的纯净度,特别是将 $w[S]$ 降低至 0.000 5% 的水平。此外,Chen 等^[145]对比 VIM+VAR 和 VIM+ESR+VAR 工艺对 GH4738 合金纯度的影

响,对比结果见表 5,可以看出,双联熔炼工艺生产的合金中存在四种主要夹杂物,而三联熔炼工艺中仅存在两种。三联熔炼工艺的夹杂物数量更少、尺寸更小,且研究中还发现三联熔炼工艺生产合金的拉伸强度和疲劳寿命均高于双联熔炼工艺。这些研究成果进一步证实了三联熔炼工艺在大规格铸锭方面的独特优势。

表 5 采用不同熔炼技术后样品中夹杂物的类型、数量和大小

Table 5 Types, amounts, and sizes of inclusions in samples following different melting technologies

夹杂物	VIM+VAR	VIM+ESR+VAR
Ti(C, N)-MoS 数量/个	4 299	2 873
Ti(C, N)数量/个	524	458
Ce-MoS 数量/个	409	—
SiC 数量/个	398	—
其他/个	133	81
数量汇总/个	5 763	3 412
平均尺寸/ μm	3.1	2.5

随着镍基合金服役条件的严格化,更大型合金铸锭的熔炼已成为现在的发展方向。然而三联熔炼工艺中依然存在一些缺陷,其中包括开裂及偏析等。熔炼中产生的缺陷会随合金组织遗传而继续存在到后续工件中,尤其是开裂严重限制了大尺寸合金的发展^[146]。当 VIM 电极一旦出现裂纹,将降低后续 ESR 或 VAR 熔炼中电流、电压等参数的稳定性,严重时可能导致报废,造成重大经济损失^[147]。2016 年,德国的 Saarschmiede 公司生产的 23 t, $\phi 1\ 000$ 的 Alloy263 铸锭是当时世界上最大的三联熔炼工艺铸锭,而同时期最大的 VIM+ESR 双联熔炼工艺制造的 Alloy 铸锭却能够达到 70 t, $\phi 1\ 300$ ^[148]。因此,学者们多集中于三联熔炼工艺的合金开裂机理探索,通过合适的操作制度或后续处理等方式避免或消除裂纹。

1) 铸锭开裂机理。高温下的裂纹形式主要为热裂,其发生在凝固的最后阶段,此时,固相含量较高,热裂纹在枝晶间液膜或晶界中扩展。此阶段的合金处于拉应力状态,液体孔隙率受到限制。因此热裂是由拉伸应力过大与液相不足引起的^[146, 149]。影响热裂敏感性的因素主要有铸造参数和化学成分^[150],然而,当前阶段专门针对高温合金铸锭凝固中热裂纹产生的具体机理研究还比较缺乏^[146, 151]。

Jia 等^[147]对 GH4151 合金在三联熔炼工艺下的开裂行为研究中发现,VIM 合金锭的裂纹为热裂且

沿枝晶间扩展,形成的主要原因是元素偏析和复杂相的析出;而 ESR 和 VAR 合金锭的裂纹为冷裂,其中,ESR 合金锭的裂纹穿晶扩展,VAR 合金锭则沿晶和穿晶混合扩展, γ' 相分布不均是导致这些裂纹的主要原因^[152]。Chen 等^[153]同样对 GH4151 合金进行研究并提出适用性的热裂敏感性系数公式。指出当冷却速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 时,合金对热裂纹最为敏感。减少凝固过程中柱状晶生长也能抑制热裂纹产生,因此,Wang 等^[154]对三联熔炼工艺生产的 GH4742 合金进行研究,发现进行永磁搅拌(Permanent Magnetic Stirring, PMS)的合金在凝固时能够使枝晶破碎,进而阻止柱状晶生长,但随搅拌转速增加合金开裂现象并未进一步改善。

2) 工艺参数优化。三联熔炼工艺中的高温合金由于合金化程度较高,使其在微观中存在枝晶偏析^[122],同时宏观上也存在白斑、宏观偏析等,参数的不合理使铸锭可能出现明显的缩孔、热应力甚至开裂^[155]。脱模过程同样可能会产生裂纹,在铸锭凝固中,内部的较大温差导致高热应力水平。如果在炉内冷却停留时间不足便取出进行脱模,应力集中或热应力过大可能导致开裂,甚至整体报废^[156]。

Jia 等^[147]对 GH4151 合金的三联熔炼工艺进行研究,基于流体力学计算,得到了适合于铸锭脱模时间为 57 min 的结论。Li 等^[157]对 IN718 合金熔炼的脱模过程进行数值模拟,确定了适用于 500 kg 及以上级别铸锭熔炼的工艺参数。Zhang 等^[158]对 Waspaloy 合金铸锭的熔炼过程使用 ProCast 软件进行数值模拟,通过构建相应热裂纹产生判据,确定了合适的脱模时间,铸锭脱模后的开裂倾向模拟结果如图 12 所示,图中开裂判据 P_1 指第一强度理论即最大拉应力理论;开裂判据 P_4 指第四强度理论即畸变能理论。通过对实际生产的 3 t 铸锭进行对比验证了计算的准确性。同时,Zhang 等^[110]也对 IN718 合金使用 MeltFlow 和 Abaqus 软件进行了模拟,进而建立含应力计算的重熔模型和开裂判据,模拟结果与实验相符,能够准确确定安全脱模时间,这为优化熔炼工艺并提高铸锭质量提供了重要参考。

3) 热处理及均匀化。在镍基高温合金中,热裂纹的产生是因为枝晶偏析从而生成脆性相,采用热处理的手段可减少合金在 VIM 熔炼中产生的热裂纹^[159]。同时,经过均匀化处理,能够降低合金偏析程度,从而减少缺陷对铸锭的影响^[160]。

Jia 等^[147]对 VIM 熔炼的 GH4151 合金 ESR 电极

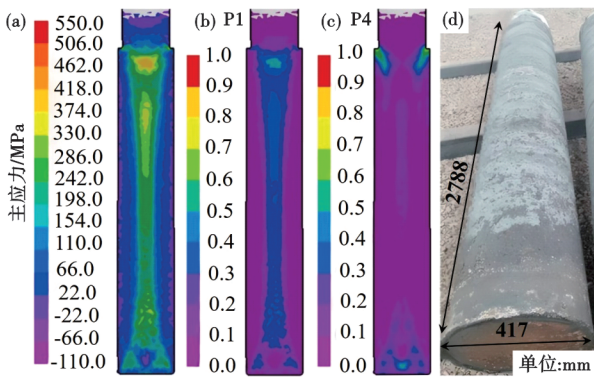


图 12 VIM 生产 3 吨 Waspaloy 铸锭脱模后开裂倾向比较: (a)第一主应力, (b)开裂判据 P_1 , (c)开裂判据 P_4 , (d)铸锭表面

Fig. 12 Comparison of 3 t Waspaloy VIM ingot cracking tendency after demolding : (a) the first principal stress, (b) cracking criterion P_1 , (c) cracking criterion P_4 , (d) ingot surface

进行退火处理,铸态与退火态合金的工程应力-应变曲线如图 13 所示,可以发现无论室温还是高温,退火处理均改善了合金的力学性能,尤其高温下退火态合金的抗拉强度和伸长率上升趋势更加明显。同时, Jia 等^[161]还发现三联熔炼工艺生产的 GH4151 铸锭主要由晶界处的 MC 碳化物、大尺寸的 γ' 相及残留的共晶化合物引发裂纹,随后进行热压缩实验,确定了不连续动态再结晶是其主要的形核机制,并绘制热加工图确定了合适的温度范围为 1 120~1 135 °C,合适的应变速率为 0.1~1 s⁻¹。此外, Yao 等^[162]观察并对比了不同工艺生产的 GH4169 合金热变形行为,包括三联熔炼工艺的铸态、均匀化以及增材制造,其中均匀化态合金表现

出比铸态更优异的性能,枝晶偏析明显消除,晶粒尺寸和沉淀相分布也更均匀,大幅度降低了裂纹的形成概率。

结合以上学者的研究看出,尽管三联熔炼工艺已被广泛应用于高质量镍基高温合金的纯净化熔炼中,但有关缺陷的表征与消除仍是众多学者及机构的进一步研究方向。况且我国三联熔炼工艺发展起步较晚,技术掌握方面与欧美国家相比仍不成熟,在洁净度和性能上存在不足之处,尤其是我国自主研发的大规格 GH4169 合金,成分均匀性与力学性能方面与美国生产的 IN718 合金相比仍有差距^[29],在此基础上,我国将进一步着手于 GH4169 合金的性能优化及新型镍基高温合金的相关研究^[163]。

4 熔炼工艺的选择

综合单炼、双联熔炼及三联熔炼工艺的特点来看,三联熔炼工艺无疑是保证镍基高温合金纯净度最好的熔炼方法,但此工艺工序复杂,成本较高,并不适用于每一种合金。在实际生产中,需综合考虑合金成分、性能要求和生产成本等要素,进而选择恰当的熔炼工艺。表 6 和表 7 分别展示了不同熔炼工艺的特点比较及典型代表性镍基高温合金的熔炼路线。

VIM 熔炼已相当成熟且成本较低,对整个合金的化学成分精确控制能力强,能够去除部分气体和夹杂物,但无法适用于一些对杂质含量很敏感且成分均匀性要求严格的高温合金。因此,对于纯净度要求相对不是很高且有一定性能要求的小型合金,采用 VIM 熔炼能够初步满足服役条件。具有典型代表性的通常是 FGH95、FGH96、FGH97 等粉末高温合金和 K435、K444、K452^[164]等铸造高温合金。

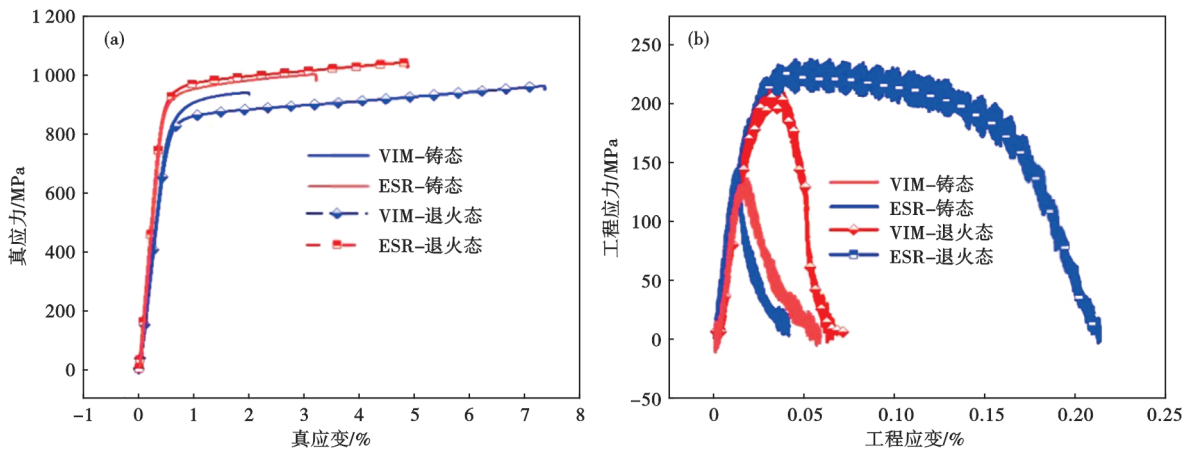


图 13 GH4 151 样品的铸态和退火处理的工程应力-应变曲线: (a)室温, (b) 1 100 °C

Fig. 13 Engineering stress-strain curves of the as-cast and annealing treatment of GH4 151 samples : (a) room temperature, (b) 1 100 °C

表 6 不同熔炼工艺的特点比较

Table 6 Characteristics comparison of different melting processes

工艺路线	优点	缺点	适用高温合金类型
VIM	成本低、成分精确控制能力强、去除气体与夹杂	无法满足大规格合金的更高纯净度要求	纯净度要求低的小型合金
VIM+ESR	脱硫率高、进一步去除气体与夹杂、改善热变形塑性	Al、Ti 元素烧损严重、对熔渣要求高、易产生偏析	纯净度要求较高的中小型规格合金
VIM+VAR	散热好、降低易氧化元素的烧损	脱硫效果较差、易产生黑/白斑	合金化程度低和易氧化元素烧损控制要求高的中大型合金
VIM+ESR+VAR	结合各熔炼工艺优点、最大程度保证纯净度、利于大规模铸锭熔炼	工序复杂、时间和经济成本较高	对纯净度和综合性能有超高标准的大型复杂形状合金

表 7 典型代表性镍基高温合金的熔炼路线

Table 7 Melting route of typical Ni-based superalloys

工艺路线	典型代表性高温合金牌号
VIM	FGH95、FGH96、FGH97、FGH99、K435、K444、K452
VIM+ESR	GH4033、GH4099、GH4169、GH4118、GH4302、GH4761、GH4049、GH4037、GH4146、GH4118
VIM+VAR	GH4141、GH4586、GH4738、GH4698、GH4220、GH4302、GH4761、GH3039、GH3044
VIM+ESR+VAR	GH4151、GH4169、GH4738、GH4706、GH4169D

VIM+ESR 双联熔炼工艺能够进一步去除 S 等杂质元素及非金属夹杂,同时改善热变形塑性,使合金在高温下保持良好力学性能,进而得到表面质量较好的铸锭,但 Al、Ti 等元素的烧损及偏析问题较为严重,因此,VIM+ESR 双联熔炼工艺适用于纯净度要求较高的中小型规格合金,同时,保证 Al、Ti 等易烧损元素的控制要求低。典型代表性的高温合金牌号有 GH4033、GH4099、GH4169 等^[86, 96]。

VIM+VAR 双联熔炼工艺因受到水冷铜结晶器的冷却作用而具备良好的散热条件,且双真空也形成一种低氧环境,有助于降低易氧化元素的氧化烧损。然而,对于 P、S 等杂质元素的去除效果并不明显,且易产生黑/白斑问题。再结合成本,VIM+VAR 双联熔炼工艺适用于合金化程度低和易氧化元素的烧损控制要求高的合金。典型代表性的高温合金牌号有 GH4141、GH4586、GH4738 等^[16, 145, 165]。

VIM+ESR+VAR 三联熔炼工艺能够充分结合各熔炼技术的优势,最大限度确保高温合金纯净度,尽管这一工艺会增加相应的时间和经济成本。因此,三联熔炼工艺一般适用于对纯净度和综合性能有超高标准的大型复杂高温合金。典型代表性的高温合金牌号有 GH4151、GH4169、GH4738 等^[143, 145, 147, 166]。

5 结语

镍基高温合金的熔炼工艺对其性能与质量优劣起着重要作用。本文综述了单炼、双联以及三联熔炼工艺特征及其在镍基高温合金的应用情况。

主要结论如下:

1) 单炼工艺(VIM):适用于对纯净度要求较低的小型高温合金生产。该工艺具备成本低廉、操作流程简便以及化学成分控制精确等优势。然而,在杂质元素控制及缩孔偏析等方面,该工艺仍存在一定局限性。

2) 双联熔炼工艺(VIM+ESR、VIM+VAR):在单炼工艺的基础上提升了合金的纯净度与综合性能。具体而言,VIM+ESR 双联熔炼工艺适用于中小型规格的高温合金生产,能够高效去除硫等杂质元素,但会导致 Al、Ti 等元素的过度烧损。相比之下,VIM+VAR 双联熔炼工艺更适用于合金化程度较低且对易氧化元素烧损控制要求较高的合金,其具备良好的散热条件与低氧环境,但可能会引发偏析及表面斑点等缺陷。

3) 三联熔炼工艺(VIM+ESR+VAR):三联熔炼工艺充分综合 VIM、ESR 和 VAR 的优点,能够最大限度保证合金纯净度,适用于对纯净度和性能有超高标准的大型复杂形状高温合金。然而,该工艺工序复杂、成本较高,且在我国的掌握与应用方面仍有提升空间。

当前,虽然熔炼工艺已取得显著进步,镍基高温合金的熔炼仍存在一些亟待解决的问题,熔炼工艺的研究与发展将主要体现在以下几个方面:

4) 在 VIM 熔炼方面,应致力于优化熔炼工艺中的各项关键参数,如熔炼时间、真空度等,并持续探索 and 开发新型熔炼技术,以实现 S、O、N 等杂质元

素及某些缺陷的高精度控制。

5)在ESR/VAR熔炼方面,针对元素烧损、偏析、黑/白斑等缺陷,进一步探究其形成规律与协同控制机理,借助数值模拟技术和大数据分析等手段,精准预测不同缺陷的形成规律,进而调整其关系降低

缺陷形成概率。

6)在三联熔炼工艺方面,为满足大规格高温合金的迫切需求,亟须优化各熔炼阶段的协调性,以提高合金整体均匀性及力学性能,缩小我国熔炼技术与国外先进水平之间的差距。

参考文献

- [1] Zhao W Y, Ren Q G, Yao Z H, et al. Multi-scale calculation-aided composition optimization design of low-density and high-strength nickel-based superalloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2023, 54(10): 3796-3819.
- [2] 张国庆, 滕超逸. 航空航天先进结构材料技术现状及发展趋势[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(2): 1-12.
- [3] 逯红果, 马中钢, 李化坤, 等. 铸造镍基高温合金重熔工艺的研究进展[J]. *热加工工艺*, 2023, 52(13): 1-5+11.
- [4] 万宏远, 刘壮壮, 韩泉泉, 等. 激光增材制造高温合金抗开裂行为研究进展[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(9): 26-42.
- [5] Zhou H J, You X G, Bi Z N, et al. Quantitative analysis and formation mechanisms of non-metallic inclusions in GH4068 alloy prepared by vacuum induction melting [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 22: 2212-2221.
- [6] Tien J K, Nardone V C. The U. S. superalloys industry—Status and outlook[J]. *JOM*, 1984, 36(9): 52-57.
- [7] 姜周华, 张新法, 刘福斌, 等. 镍基高温合金生产用原材料有害杂质的控制[J]. *钢铁*, 2017, 52(9): 1-10.
- [8] 操齐高, 马光, 郑晶. 高温合金杂质控制水平国内外对比分析研究[J]. *科技创新导报*, 2015, 12(30): 3-4+35.
- [9] Shen Z M, Guo J, Duan S C, et al. Thermodynamics and optimization of a slag system for Al and Ti burning loss control of a Φ 1100-mm Ni-based superalloy ingot during the electroslag remelting process[J]. *JOM*, 2023, 75(7): 2636-2645.
- [10] 尹彬, 李万明, 吴少鹏, 等. Inconel718高温合金电渣重熔铝钛元素烧损热力学分析[J]. *钢铁*, 2019, 54(5): 86-94.
- [11] Abbasi M, Kim D I, Shim J H, et al. Effects of alloyed aluminum and titanium on the oxidation behavior of INCONEL 740 superalloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 658: 210-221.
- [12] Eggeler Y M, Vamsi K V, Pollock T M. Precipitate shearing, fault energies, and solute segregation to planar faults in Ni-, CoNi-, and co-base superalloys [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2021, 51: 209-240.
- [13] 张北江, 黄烁, 张文云, 等. 变形高温合金盘材及其制备技术研究进展[J]. *金属学报*, 2019, 55(9): 1095-1114.
- [14] Alam T, Felfel P J, Chaturvedi M, et al. Segregation of B, P, and C in the Ni-based superalloy, inconel 718 [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43(7): 2183-2191.
- [15] Pustal B, Wittenzellner T, Behnken H, et al. Experimental analysis and simulation of freckle formation at different edge angles during directional solidification of Ni-base superalloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2024, 55(4): 2732-2738.
- [16] 谭海兵, 黄烁, 王静, 等. 白斑缺陷对GH4586合金组织和力学性能的影响[J]. *金属学报*, 2020, 56(10): 1411-1422.
- [17] 朱耀宵. 师昌绪在高温合金领域的重大贡献[J]. *科技导报*, 2018, 36(19): 21-25.
- [18] 杨明. GH141高温合金不同成分元素的作用[J]. *冶金与材料*, 2024, 16(12): 58-60.
- [19] Gao R Z, Li L, Chen C Y, et al. Formation and aggregation behavior of inclusions in Ni-based alloys with different Mg contents [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 5252-5263.
- [20] Hou D, Jiang Z H, Dong Y W, et al. Effect of slag composition on the oxidation kinetics of alloying elements during electroslag remelting of stainless steel: Part-1 mass-transfer model [J]. *ISIJ International*, 2017, 57(8): 1400-1409.
- [21] 吴树森, 吕书林, 刘鑫旺. 有色金属熔炼入门与精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 263-293.
- [22] 李化坤, 马中钢, 逯红果, 等. 镍基高温合金真空感应熔炼过程研究[J]. *山东冶金*, 2020, 42(5): 33-34+37.
- [23] Schlatter R. Melting and refining technology of high-temperature steels and superalloys: A review of recent process developments [C]. *Superalloys 1972*, 1972: A-1-A-40.
- [24] Kennedy R, Jones R F, Davis R, et al. Superalloys made by conventional vacuum melting and a novel spray forming process [J]. *Vacuum*, 1996, 47(6-8): 819-824.
- [25] Shi C B, Huang Y, Zhang J X, et al. Review on desulfurization in electroslag remelting [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2021, 28(1): 18-29.
- [26] Xu X, Zhang W, Lee P D. Tree-ring formation during vacuum arc remelting of INCONEL 718: Part II. Mathematical modeling [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002, 33(6): 1805-1815.
- [27] 岳江波. 真空感应熔炼炉工艺特点及其技术进展[J]. *山西冶金*, 2017, 40(2): 33-36.
- [28] 俞杰. 浅谈真空感应熔炼技术的发展及未来动向[J]. *科技展望*, 2016, 26(33): 100.
- [29] 张勇, 李佩桓, 贾崇林, 等. 变形高温合金纯净熔炼设备及工艺研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(9): 1496-1506.
- [30] 王晓峰, 周晓明, 穆松林, 等. 高温合金熔炼工艺讨论[J]. *材料导报*, 2012, 26(7): 108-113+135.
- [31] 李正邦. 电渣冶金的发展历程、现状及趋势[J]. *材料与冶金学报*, 2011, 10(S1): 1-7.
- [32] Kracke A. Superalloys, the most successful alloy system of modern times—past, present, and future [C]. *7th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives (2010)*, 2010: 13-50.
- [33] Kong H H, Hou Y Q, Qin H L, et al. Simulation study of solid-

- state phase transformation in IN738 superalloy by electron beam melting[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2025, 2954(1): 012011.
- [34] Ning L D, Tan Y, Wen S T, et al. Numerical analysis and process optimization of electron beam melting for superalloys[J]. *Energy*, 2024, 300: 131481.
- [35] Chen S F, Song W, Lu N N, et al. Unveiling the temperature-dependent tensile behavior of additively manufactured superalloys with varying carbon contents[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 925: 147897.
- [36] Liu Y Z, Chen L J, Ren Q L, et al. Deformation behavior and strengthening mechanisms of a novel powder metallurgy Ni-based superalloy during in situ tensile testing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 926: 147942.
- [37] Wang R Q, You W C, Zhang B, et al. Constitutive modeling of creep behavior considering microstructure evolution for directionally solidified nickel-based superalloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 919: 147499.
- [38] Rai R K, Chandra S, Singh A P, et al. Oxidation-fatigue damage mechanisms in a directionally solidified Ni-based superalloy at 850°C[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 922: 147630.
- [39] 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.
- [40] Gao X Y, Zhang L, Qu X H, et al. Effect of interaction of refractories with Ni-based superalloy on inclusions during vacuum induction melting[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2020, 27(11): 1551-1559.
- [41] 任 晓, 肖 晶. 高温合金真空感应熔炼工艺研究[J]. *世界有色金属*, 2018(10): 18+21.
- [42] Wang F W, Cheng Y, Zhang S B, et al. The influence of yttrium content and ceramic crucible materials on desulfurization during vacuum induction melting of DD5 superalloys[J]. *Metals*, 2024, 14(3): 353.
- [43] 赵云松, 赵婷婷, 张 迈, 等. S元素对镍基高温合金及其涂层组织和性能的影响研究进展[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(3): 96-110.
- [44] Zhang T, Wei Y W, Chen J F, et al. Preparation of CaO-MgO-ZrO₂ refractory and its desulfurization effect on Ni-based alloy in vacuum induction melting (VIM)[J]. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2020, 56(3): 885-894.
- [45] Utada S, Joh Y, Osawa M, et al. Creep property and phase stability of sulfur-doped Ni-base single-crystal superalloys and effectiveness of CaO desulfurization [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49(9): 4029-4041.
- [46] Kishimoto Y, Kono T, Horie T, et al. Temperature dependence of CaO desulfurization mechanism in molten Ni-base superalloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2021, 52(3): 1450-1462.
- [47] Kishimoto Y, Iguchi T, Kono T, et al. Desulfurization mechanism of molten Ni-base superalloy containing Al using CaO rod [C]. *Advances in Materials Technology for Power Plants*, 2019: 426-432.
- [48] Horie T, Kono T, Kishimoto Y, et al. The effect of CaO-MgO mixture on desulfurization of molten Ni-base superalloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2021, 52(4): 2687-2702.
- [49] Li J P, Zhang H R, Gao M, et al. Mechanism of yttrium in deep desulfurization of NiCoCrAlY alloy during vacuum induction melting process[J]. *Rare Metals*, 2022, 41(1): 218-225.
- [50] Lin C Y, Sheng N C, Fan S G, et al. Effect of rare earth oxides on desulfurization reaction at CaO ceramic surface during smelting of Ni-based superalloy[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 620: 156831.
- [51] Fan S G, Sheng N C, Zhu X H, et al. Study on the interface reaction mechanism between CaO-Y₂O₃ compound system and superalloy melt[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1010: 178012.
- [52] 徐 超, 仵启亮, 姚志浩, 等. 晶界氧化对GH4738高温合金疲劳裂纹扩展的作用[J]. *金属学报*, 2017, 53(11): 1453-1460.
- [53] 李清华, 牛建平. 镍基高温合金的真空感应熔炼脱氧[J]. *热加工工艺*, 2003, 32(3): 33-34.
- [54] 王国全, 韩 笑, 王 飞, 等. 镍基高温合金脱氧的研究[J]. *真空*, 2005, 42(3): 40-42.
- [55] 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[J]. *钢铁研究学报*, 2011, 23(S2): 5-8.
- [56] 马秀萍, 周同金, 刘东方, 等. 真空感应熔炼工艺对镍基高温合金氧氮含量的影响[J]. *铸造*, 2019, 68(7): 730-733.
- [57] Moshtaghi M, Safyari M. Effect of dwelling time in VIM furnace on chemical composition and mechanical properties of a Ni-Fe-Cr alloy[J]. *Vacuum*, 2019, 169: 108890.
- [58] Akande I G, Oluwole O O, Fayomi O S I, et al. Overview of mechanical, microstructural, oxidation properties and high-temperature applications of superalloys[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 43: 2222-2231.
- [59] Moshtaghi M, Abbasi S M. Effect of vacuum degree in VIM furnace on mechanical properties of Ni-Fe-Cr based alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(9): 2124-2130.
- [60] 叶文成, 谷 宇, 王 岩. Inconel 601 镍基高温合金真空感应熔炼脱氧工艺研究[J]. *铸造*, 2024, 73(11): 1529-1533.
- [61] Gao J G, Yang S L, Yang S F, et al. Evolution of inclusions in vacuum induction melting of superalloys containing 70% return material [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2024, 31(3): 719-728.
- [62] 姚正辉, 牛建平, 王 飞, 等. 镍基高温合金脱氮工艺研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2009(4): 49-51.
- [63] 牛建平, 杨克努, 金 涛, 等. 真空感应熔炼超纯净镍基高温合金脱氮的研究[J]. *金属学报*, 2001, 37(9): 943-946.
- [64] 王 旻, 张 龙, 杨亚倩, 等. 高Cr镍基合金脱氮反应热力学与动力学研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(11): 3803-3808.
- [65] 李清华, 牛建平. 镍基高温合金真空感应熔炼脱氮的研究

- [J]. 真空, 2003, 40(2): 45-47.
- [66] 王飞. 镍基高温合金真空感应熔炼脱氮工艺及机理的研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2007.
- [67] 桂忠楼, 吴昌新, 孙传棋, 等. 航空用优质高温合金锭制造技术的研究[J]. 材料工程, 2002, 30(3): 20-23.
- [68] Wang N, Gao J G, Yang S L, et al. Numerical simulation of the denitrification reaction of INCONEL 718 superalloy during vacuum induction melting[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(3): 1474-1483.
- [69] Qian K, Chen B, Zhang L, et al. Kinetics study of nitrogen removal from liquid IN718 alloy during vacuum induction melting[J]. Vacuum, 2020, 179: 109521.
- [70] Zhao P, Gao J G, Yang S F, et al. Effect of revert addition on the nitrogen removal from liquid superalloy during vacuum induction melting process: Experimental and simulation studies[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2024, 55(1): 431-445.
- [71] Zhu J J, Jiang L, Zhai L H, et al. Effect of TiN inclusions on oxidation behavior of austenitic stainless steels[J]. Materials Letters, 2023, 335: 133761.
- [72] Descotes V, Quatravaux T, Bellot J P, et al. Titanium nitride (TiN) germination and growth during vacuum arc remelting of a maraging steel[J]. Metals, 2020, 10(4): 541.
- [73] Wang L, Xue Z L, Zhu H Y, et al. Thermodynamic analysis of precipitation behavior of Ti-bearing inclusions in SWRH 92A tire cord steel[J]. Results in Physics, 2019, 14: 102428.
- [74] Wang J, Wang L Z, Li J Q, et al. Effects of aluminum and titanium additions on the formation of nonmetallic inclusions in nickel-based superalloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 906: 164281.
- [75] Hardin R A, Beckermann C. Effect of porosity on deformation, damage, and fracture of cast steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(12): 5316-5332.
- [76] 刘可立, 王俊升, 郭跃岭, 等. 镍基单晶高温合金孔洞缺陷数值模拟与控制方法研究进展[J]. 航空制造技术, 2020, 63(16): 75-85.
- [77] 李超, 刘佳, 于昂, 等. 铸造高温合金真空感应熔炼过程的研究[J]. 真空, 2016, 53(2): 37-41.
- [78] 成建强, 胡显军, 顾晔, 等. 发热保温冒口在高温合金真空浇注中的应用[J]. 铸造技术, 2016, 37(1): 110-113.
- [79] Khalajzadeh V, Beckermann C. Simulation of shrinkage porosity formation during alloy solidification[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(5): 2239-2254.
- [80] 周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势[J]. 铸造, 2012, 61(10): 1105-1115.
- [81] Zhang P, Liu G H, Wang Y, et al. Optimization of investment casting parameters for reduction of shrinkage porosity in nickel-based superalloy castings by Taguchi method[J]. International Journal of Modern Physics B, 2021, 35(10): 2150136.
- [82] Morscheiser J, Thönessen L, Gehrman B, et al. The influence of the slag composition on the desulphurization of nickel-based superalloys[J]. Metall Mater Trans B, 2012, 22(4): 89.
- [83] Beswick J M. Remelt special steel steelmaking technologies[J]. ASTM International, 2022, 22: 446.
- [84] Li W M, Sun Y L, Wu S P, et al. Oxidizability characterization of slag system on the thermodynamic model of superalloy desulfurization[J]. High Temperature Materials and Processes, 2020, 39(1): 405-416.
- [85] Tan J P, Wang F, Liu Z Q, et al. A thermodynamic model for predicting Ti and Al element of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-TiO}_2\text{-CaO-MgO-CaF}_2$ slag in electroslag remelting process[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 4702-4715.
- [86] 邢宝富, 郭仁辉, 杨松, 等. GH4033合金保护气氛电渣重熔Al、Ti含量控制[J]. 物理测试, 2018, 36(5): 57-60.
- [87] Hou D, Wang D Y, Zhou X Z, et al. Study on physical and chemical properties of slag used for electroslag remelting of superalloy containing titanium and aluminum[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(5): 2972-2990.
- [88] 巨建涛, 杨康帅, 棘广恒, 等. Incoloy825合金电渣重熔低氟渣系设计的热力学研究[J]. 工程科学学报, 2020, 42(S1): 119-127.
- [89] 李乐松, 朱勤天, 王民庆, 等. GH4169D合金电渣重熔过程中铝钛元素烧损规律及精准调控技术[J]. 中国冶金, 2024, 34(11): 83-92.
- [90] Duan S C, Shi X, Mao M T, et al. Investigation of the oxidation behaviour of Ti and Al in inconel 718 superalloy during electroslag remelting[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 5232.
- [91] Li L S, Wang M Q, Zhu Q T, et al. Control of aluminum and titanium contents in the electroslag remelting of ATI 718Plus™ alloy[J]. Materials, 2024, 17(6): 1254.
- [92] 彭龙生, 刘春泉, 周浩, 等. 电渣重熔新技术的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2022, 36(S1): 472-480.
- [93] Liu Y, Wang X J, Li G Q, et al. Cleanliness improvement and microstructure refinement of ingot processed by vacuum electroslag remelting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2): 1619-1630.
- [94] Shi C B. Deoxidation of electroslag remelting (ESR)-A review[J]. ISIJ International, 2020, 60(6): 1083-1096.
- [95] 李宝宽, 黄雪驰, 刘中秋, 等. 现代电渣重熔先进技术特征与演进[J]. 钢铁, 2022, 57(6): 1-11.
- [96] 陈韩锋, 张东. 气氛保护电渣重熔GH4169的冶金质量及锻造性能分析[J]. 甘肃科技, 2021, 37(7): 53-57.
- [97] 赵子民, 孙欣, 侯栋, 等. 普通电渣炉的全密闭气氛改造及其对典型钢种的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(4): 99-103.
- [98] Li T F, Li G Q, Liu Y, et al. Effect of MgO on the fluoride vaporization and crystallization of $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-(MgO)}$ slag for vacuum electroslag remelting[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147(20): 11445-11455.
- [99] Wang X J, Liu Y, Li G Q, et al. Effect of Ce_2O_3 on the fluoride vaporization of $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-(Ce}_2\text{O}_3)$ slag used for vacuum electroslag remelting[J]. Vacuum, 2021, 185: 109997.
- [100] Huang X C, Li B K, Liu Z Q, et al. Numerical study on the effect of vacuum on oxygen transfer in electroslag remelting process[J]. Vacuum, 2020, 172: 109069.
- [101] 刘喜海, 刘景远, 渠洪波, 等. 国内首台真空电渣炉的研制

- [J]. 真空, 2017, 54(3): 56-58.
- [102] 刘景远, 徐成海, 李广田, 等. 工业化 2 t 真空电渣炉的研发[J]. 铸造, 2016, 65(1): 52-55.
- [103] 张菽浪. 高温合金的电渣重熔(ESR)和真空电弧重熔(VAR)[J]. 特钢技术, 2020, 26(1): 44.
- [104] 石 骁. 电渣重熔大型 IN718 镍基合金铸锭凝固和偏析行为基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [105] Manikandan S G K, Sivakumar D, Rao K P, et al. Effect of weld cooling rate on Laves phase formation in Inconel 718 fusion zone[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(2): 358-364.
- [106] Liu F B, Cao H B, Li H B, et al. Effects of current path on structure and segregation during electroslag remelting process of Inconel 718 alloy with same power input[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2021, 28(12): 1574-1581.
- [107] Medovar L, Petrenko V, Tsykoulenko A, et al. ESR with two power sources and process control: Proceedings of the 2005 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting [C]. Ukraine: Materials Engineering, 2005: 131-135.
- [108] Dong Y W, Hou Z W, Jiang Z H, et al. Study of a single-power two-circuit ESR process with current-carrying mold: Mathematical simulation of the process and experimental verification [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2018, 49(1): 349-360.
- [109] Yin X C, Liu J R, Wang Q J, et al. Quantitative characterization of beta fleck segregation in a Ti-17 alloy ingot produced by vacuum arc remelting without electromagnetic stirring[J]. *Metals and Materials International*, 2025, 31(7): 2123-2135.
- [110] Zhang H N, Li X, Zhang T, et al. Remelting model and cracking criterion for vacuum arc remelting of superalloys: Taking IN718 as an example [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2024, 55(5): 3848-3865.
- [111] Cui J J, Li B K, Liu Z Q, et al. Numerical investigation of segregation evolution during the vacuum arc remelting process of Ni-based superalloy ingots [J]. *Metals*, 2021, 11(12): 2046.
- [112] Asim U B, Borkowski L, Staroselsky A. Ultrasonic enhancement of vacuum arc remelting process for dirty white spot mitigation [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2025, 56(2): 1766-1782.
- [113] 李俊杰, 李盼悦, 黄立清, 等. 真空自耗电弧熔铸铸锭凝固行为多尺度模拟研究进展 [J]. 金属学报, 2025, 61(1): 12-28.
- [114] Grignard J F, Soller A, Jourdan J, et al. On the formation of white-spot defects in a superalloy VAR ingot [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2011, 13(7): 563-569.
- [115] 于 腾, 杨玉军, 宋 彬, 等. 真空电弧重熔过程中白斑缺陷的成因分析 [J]. 金属功能材料, 2022, 29(2): 28-33.
- [116] 董建新, 张麦仓, 曾燕屏. “黑斑”形成机理及判据 [J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(1): 1-5.
- [117] Yang S L, Tian Q, Yu P, et al. Numerical simulation and experimental study of vacuum arc remelting (VAR) process for large-size GH4742 superalloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 2828-2838.
- [118] 赵雅婷, 陈濛潇, 魏志刚. VAR 熔炼 GH2130 合金点状缺陷的分析 [J]. 宝钢技术, 2015, 8(3): 35-38.
- [119] 王资兴, 王 磊, 孙文儒. 熔速对 IN718 合金真空自耗铸锭组织的影响 [J]. 材料热处理学报, 2019, 40(1): 91-97.
- [120] 杨曙磊. GH4742 合金真空自耗重熔中夹杂物的行为基础研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2024.
- [121] 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.
- [122] Zhao P, Gu Y, Yang S F, et al. Study on the molten pool behavior, solidification structure, and inclusion distribution in an industrial vacuum arc remelted nickel-based superalloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2023, 54(2): 698-711.
- [123] Patel A D, Murty Y V. Effect of cooling rate on microstructural development in alloy 718 [C]. *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives (2001)*. , 2001: 123-132.
- [124] Nawrocki J, Motyka M, Szeliga D, et al. Effect of cooling rate on macro- and microstructure of thin-walled nickel superalloy precision castings [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 49: 153-161.
- [125] 黄科杰, 孙 悦, 张麦仓, 等. 不同冷却速率对 GH4151 高温合金定向凝固组织及元素偏析的影响 [J]. 材料热处理学报, 2024, 45(4): 87-94.
- [126] Karimi-Sibaki E, Kharicha A, Wu M, et al. A parametric study of the vacuum arc remelting (VAR) process: Effects of arc radius, side-arc, and gas cooling [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2020, 51(1): 222-235.
- [127] 张立红, 陈 杰, 曹秀丽, 等. 氦气冷却真空自耗冶炼 GH738 合金冶金质量 [J]. 上海钢研, 2005(3): 20-23.
- [128] 李思彤. 真空自耗电弧重熔 GH4169 凝固过程黑斑与白斑形成研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- [129] Wang Z C, Li J R, Liu S Z, et al. Microstructural characteristics of freckles in Ni-based Single crystal superalloys [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(10): 3533-3541.
- [130] Wang X H, Ward R M, Jacobs M H, et al. Effect of variation in process parameters on the formation of freckle in INCONEL 718 by vacuum arc remelting [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, 39(12): 2981-2989.
- [131] 代朋超, 魏志刚, 王资兴, 等. 一种镍基高温合金黑斑缺陷的组织分析及形成机理研究 [J]. 宝钢技术, 2014(5): 49-53.
- [132] 李 桐, 沈厚发. IN718 高温合金水平定向凝固和真空电弧重熔过程中“黑斑”形成的多组元数值模拟 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(11): 4076-4084.
- [133] 王资兴, 黄 烁, 张北江, 等. 高合金化 GH4065 镍基变形高温合金点状偏析研究 [J]. 金属学报, 2019, 55(3): 417-426.
- [134] Auburtin P, Wang T, Cockcroft S L, et al. Freckle formation and freckle criterion in superalloy castings [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2000, 31(4): 801-811.
- [135] Valdés J, King P, Liu X B. On the formulation of a freckling criterion for Ni-based superalloy vacuum arc remelting ingots [J].

- Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(9): 2408-2416.
- [136] Böttger B, Schmitz G J, Wahlers F J, et al. Development and application of a new freckle criterion for technical remelting processes[J]. MATEC Web of Conferences, 2014, 14: 05002.
- [137] Genereux P D, Borg C A. Characterization of freckles in a high strength wrought nickel superalloy [C]. Superalloys 2000, 2000: 19-27.
- [138] 丁世伟, 姜东滨, 张立峰. GH4169 高温合金真空自耗数值模拟[J]. 连铸, 2024, 49(3): 64-73.
- [139] Campbell J. A future for vacuum arc remelting and electroslag remelting: a critical perspective [J]. Metals, 2023, 13(10): 1634.
- [140] Moyer J M, Jackman L A, Adaszczak C B, et al. Advances in triple melting superalloys 718, 706, and 720 [C]. Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives (1994), 1994: 39-48.
- [141] Ott E A, Groh J, Sizak H. Metals affordability initiative: Application of allvac alloy 718Plus for aircraft engine static structural components [C]. Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives (2005), 2005: 35-45.
- [142] Cao W D, Kennedy R. Role of chemistry in 718-type alloys: Allvac 718plus alloy development [C]. Superalloys 2004, 2004: 91-99.
- [143] 陈国胜, 刘丰军, 王庆增, 等. GH4169 合金 VIM+PESR+VAR 三联冶炼工艺及其冶金质量[J]. 宝钢技术, 2012, 5(1): 6-10.
- [144] Du J H, Lu X D, Deng Q, et al. Progress in the research and manufacture of GH4169 alloy [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2015, 22(8): 657-663.
- [145] Chen Z Y, Yang S F, Qu J L, et al. Effects of different melting technologies on the purity of superalloy GH4738 [J]. Materials, 2018, 11(10): 1838.
- [146] Zhang L, Wang L, Liu Y, et al. Hot cracking behavior of large size GH4742 superalloy vacuum induction melting ingot [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(9): 1505-1512.
- [147] Jia L, Cui H, Yang S F, et al. The cracking behavior of the new Ni-based superalloy GH4151 in the triple melting process [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 2368-2382.
- [148] Blaes N, Bokelmann D, Diwo A, et al. Manufacture of large Ni-base ingots and forgings [C]. Proceedings of the 13th International Symposium on Superalloys, 2016: 601-608.
- [149] Xu J J, Lin X, Guo P F, et al. The initiation and propagation mechanism of the overlapping zone cracking during laser solid forming of IN-738LC superalloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 749: 859-870.
- [150] Zhou B, Lu S, Xu K L, et al. Hot cracking tendency test and simulation of 7075 semi-solid aluminium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(2): 318-332.
- [151] Xu Z Q, Liu W, Yang S F, et al. Insight into the hot tearing characteristics and constitutive behavior of GH4710 superalloy during solidification [J]. International Journal of Metalcasting, 2025: 1-18.
- [152] 贾雷. 高合金化 GH4151 合金裂纹形成机理及控制研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2024.
- [153] Chen Y, Lv S M, Xie X F, et al. Solidification behaviour and hot cracking susceptibility of a novel Ni-based superalloy [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(4): 956-966.
- [154] Wang J H, Wang L, Song X, et al. Dendrite fragmentation behavior and mechanism during the solidification of GH4742 superalloy under permanent magnetic stirring [J]. Metals and Materials International, 2025, 31(1): 237-247.
- [155] Hans S, Ruppert J M, Mitchell A. Spot segregation in alloy IN718 [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2023, 54(8): 3199-3210.
- [156] Agh A, Amini A. Investigation of the stress rupture behavior of GTD-111 superalloy melted by VIM/VAR [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2018, 25(9): 1035-1041.
- [157] Li S, Zhao Z, Zhang T, et al. Integrated simulation method and experimental validation for the vacuum induction melting process [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 1764-1775.
- [158] Zhang H N, Li S, Li X, et al. A simulation method for predicting shrinkage cavity and cracking tendency in Waspaloy vacuum induction melting ingot [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024: 1-11.
- [159] 杜金辉, 毕中南, 曲敬龙. 三联冶炼 GH4169 合金研究进展 [J]. 金属学报, 2023, 59(9): 1159-1172.
- [160] 姚凯俊, 姚志浩, 王强, 等. 高温合金涡轮盘制备数值模拟方法研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(11): 4347-4357.
- [161] Jia L, Cui H, Yang S F, et al. Hot deformation behavior and flow stress modeling of coarse-grain nickel-base GH4151 superalloy ingot materials in cogging [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 6652-6671.
- [162] Yao K J, Yao Z H, Ren Q G, et al. Difference in hot deformation behavior of a Ni-Fe based superalloy through cast-wrought and additive manufactured processes [J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 909: 146869.
- [163] 杜金辉, 吕旭东, 董建新, 等. 国内变形高温合金研制进展 [J]. 金属学报, 2019, 55(9): 1115-1132.
- [164] Cai H, Hou J S, Guo Y A, et al. The evolution of carbides during long-term creep/aging of nickel based superalloy K444 [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 3631-3640.
- [165] 朱擎, 董建新, 张麦仓, 等. GH4738 高温合金的应力松弛影响因素 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(9): 2546-2552.
- [166] 张子越, 姚志浩, 姚凯俊, 等. 大型 GH4169 高温合金铸锭开坯模拟研究 [J]. 大型铸锻件, 2024(5): 20-29.