

GH4169 真空感应过程夹杂物的演变机制

李靖^{1,2}, 蒋世川^{1,2}, 戚慧琳^{1,2}, 周扬^{1,2}

(1. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300; 2. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114009)

摘要: 高温合金中夹杂物是影响合金冶金质量和使用性能的主要因素, 因此研究了 GH4169 镍基高温合金真空感应(VIM)熔炼制备过程中夹杂物的演变机制。采用真空感应炉对 GH4169 合金进行冶炼, 通过 ASPEX 型自动扫描电镜分析检测夹杂物的物相组成、尺寸形貌及成分, 并分析夹杂物的形成机理、来源及演变机制。结果表明, 真空熔炼 GH4169 合金主要生成五种类型夹杂物: Al_2O_3 、 MgAl_2O_4 和 MgO 单层夹杂物, MgAl_2O_4 -Ti(C,N)-NbC 和 MgO -Ti(C,N)-NbC 多层复合夹杂物。 Al_2O_3 在熔化期形成, MgAl_2O_4 在精炼期形成, 加入 Nb、Al、Ti 合金化后形成 MgAl_2O_4 -Ti(C,N)-NbC 夹杂, 加入 Mg 合金化后生成 MgO 和 MgO -Ti(C,N)-NbC 夹杂。随冶炼过程的进行, 夹杂物的数量密度先增加后减少, 在精炼期夹杂物数量密度达到峰值 211.42 个/ mm^2 , 精炼期结束后, 夹杂物数量减少, 出钢前夹杂物数量密度 46.57 个/ mm^2 。

关键词: GH4169 合金; 真空感应熔炼; 夹杂物; 演变机制

中图分类号: TG132.3, TF76

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)03-0159-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.03.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Evolution mechanism of inclusions in GH4169 produced by vacuum induction melting

Li Jing^{1,2}, Jiang Shichuan^{1,2}, Qi Huilin^{1,2}, Zhou Yang^{1,2}

(1. Chengdu Institute of Advanced Metallic Material Technology and Industry Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: Inclusion had been considered as main factor affecting metallurgical quality and mechanical property of Ni-based superalloys. In this work the evolution mechanism of inclusions during the preparation of GH4169 Ni-based superalloy by vacuum induction melting (VIM) was studied. A method of ASPEX automatic scanning electron microscope was utilized to characterize the inclusions in GH4169 Ni-based superalloy prepared by vacuum induction melting (VIM). The phases, compositions, morphologies, formation mechanism and evolution mechanism of the inclusions were analyzed. The results indicate that the inclusions of single phase in GH4169 include mainly Al_2O_3 、 MgAl_2O_4 and MgO . The inclusions of composite phases include mainly MgAl_2O_4 -Ti(C,N)-NbC and MgO -Ti(C,N)-NbC. Al_2O_3 forms during melting period, MgAl_2O_4 forms during refining period, and MgAl_2O_4 -Ti(C,N)-NbC forms after alloying with Nb, Al and Ti, and MgO and MgO -Ti(C,N)-NbC form after alloying with Mg. As smelting process going, the number density of inclusions firstly increases and then decreases, and the number density of inclusions reaches a peak value of 211.42/ mm^2 during the refining period. After the

收稿日期: 2022-07-21

作者简介: 李靖, 1994 年出生, 男, 四川成都人, 硕士, 主要从事高温合金材料有关特种冶炼的研究工作, E-mail: lj19801239530@163.com。

refining period, the number of inclusions decreases, and the number density of inclusions before pouring is $46.57/\text{mm}^2$.

Key words: GH4169 alloy, vacuum induction melting, inclusions, evolution mechanism

0 引言

高温合金是以铁、镍、钴为基,能在 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的高温及一定应力作用下长期工作的一类金属材料,具有优异的高温强度,良好的抗氧化性和抗热腐蚀性能^[1],被广泛用于航空发动机、燃烧室等热端部件。高温合金能在高温条件下长时间稳定服役,主要是通过 Al、Ti、Nb 等元素的添加,在高温合金基体表面析出 γ' 或 γ'' 相,起到析出强化作用^[2-3]。然而,Al 和 Ti 作为活泼元素,在熔炼过程中极易与 O 和 N 发生化学反应,生成 Al_2O_3 、TiN 等氧化物、氮化物夹杂^[4],这类夹杂物的存在不仅会限制高温合金性能的提高,还会使合金在变形过程中容易断裂^[5]。

王迪等^[6]通过研究电渣锭的表面质量,选择合适的车削范围,从而有效降低电渣锭表面夹杂物含量,为后续真空自耗冶炼过程提供高洁净度电极棒,有助于真空自耗过程“排渣”的稳定进行。孔豪豪等^[7]研究了自耗铸锭芯部到边缘及顶端区域夹杂物的类型与分布变化情况,从而为去除夹杂物制定了合适的车削量和切头量。目前,大部分学者集中研究了 GH4169 电极棒上夹杂物的分析,而关于 GH4169 真空感应熔炼过程夹杂物的演变机制却鲜有报道。GH4169 真空感应熔炼过程夹杂物的演变机制对

GH4169 感应锭的净化具有指导意义,从根源上控制夹杂物的产生,提高感应锭冶金质量。

笔者利用实验室 150 kg 级真空感应炉对 GH4169 进行熔炼,对熔炼过程取样分析,采用 SEM、EDS 以及 ASPEX 等分析方法,对过程样中夹杂物的种类、尺寸形貌、物相组成、数量等进行了分析。为探究真空感应熔炼过程夹杂物的演变机制及控制夹杂物的产生提供了理论依据。

1 试验与检测

1.1 感应锭冶炼

利用实验室 150 kg 级真空感应炉对 GH4169 进行熔炼,工艺流程为:①熔炼:将镍、铬、铁、钼和 C 块加入坩锅中,真空度小于 5 Pa 时,开始送电加热,待炉料全部熔化后,电磁搅拌 30 min,取熔清样分析;②精炼:升温到 $1\ 580\sim 1\ 600\text{ }^\circ\text{C}$ 进行精炼,真空度控制在 0.1 Pa 以下,精炼时间 30 min,取精炼样分析;③Nb、Al、Ti 合金化:经过精炼期后加入微量合金元素 Nb、Al、Ti,电磁搅拌 30 min,取合金化样分析;④Mg 合金化:加入 Mg 合金化,电磁搅拌保持 5 min,取合金化样分析;⑤浇注:在合金化后降温,真空条件下浇铸成直径 $\text{O}200\text{ mm}$ 电极棒。合金的主要化学成分见表 1。

表 1 GH4169 高温合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of GH4169 superalloy

Ni	Cr	Mo	Nb	Al	Ti	Mg	C	Fe	%
50.0~55.0	17.0~20.0	2.8~3.2	5.0~5.5	0.5~0.7	0.8~1.5	≤ 0.05	≤ 0.08	余量	

1.2 非金属夹杂物检测方法

在熔炼的每个过程中,分别在其(桶样: $\text{O}50\text{ mm}\times 30\text{ mm}$)中心、 $R/2$ 、边缘处切取 3 块 $7\text{ mm}\times 7\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的金相试样,过程样取样区域如图 1 所示。金相样经研磨、抛光、清洗后,采用 ASPEX 型自动扫描电镜分析熔炼过程夹杂物的种类、尺寸形貌、物相组成及数量,其检测过程示意图如图 2 所示。试验检测时,圈定区域面积为 100 mm^2 ,设定 d_{max} 为 $1\ \mu\text{m}$,即不统计尺寸 $<1\ \mu\text{m}$ 的夹杂物,设定好分析参数后进行自动检测。每个过程样分析 3 块试样,取统计结果的平均值作为试验的结果。

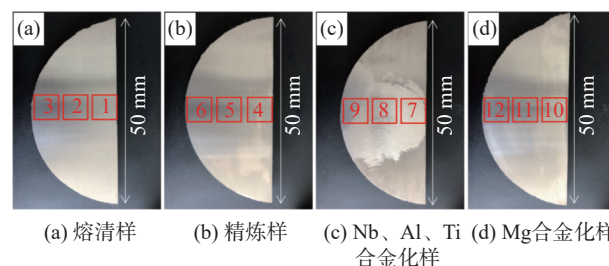


图 1 真空感应熔炼过程样取样区域
Fig. 1 Location of sampling during vacuum induction melting process

1.3 合金化学成分分析方法

合金的化学成分分析方法为: [O]、[N] 采用 ONH-2000 氧氮氢分析仪; [C] 采用碳硫分析仪。

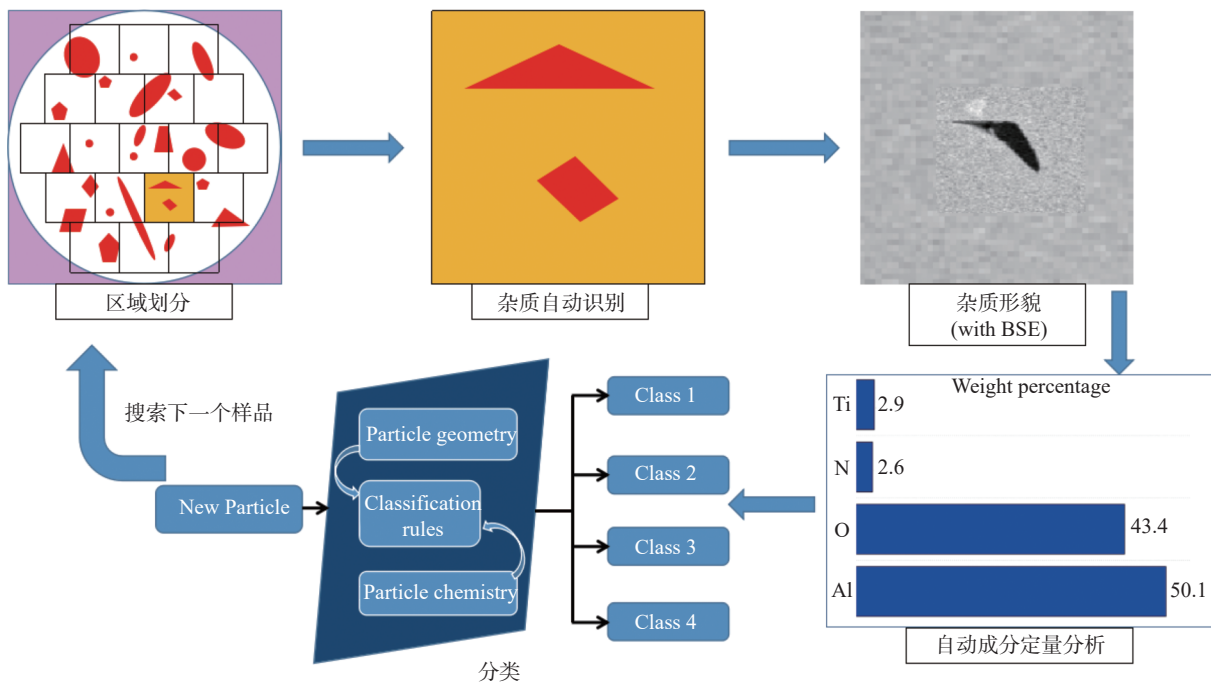


图 2 全自动钢中非金属夹杂物检测分析步骤
Fig. 2 Steps of automated analysis of non-metallic inclusions in steel

2 结果与分析

2.1 熔化期夹杂物形成机理分析

GH4169 合金熔清样中主要夹杂物为 Al_2O_3 , 其他类型夹杂物不到 1%。从图 3 可知, Al_2O_3 是三角形具有尖锐角的夹杂物, ASPEX 统计其平均直径约 $3 \mu m$ 。第一阶段装料, 由于铬原材料的不纯, 导致原料中带入高含量 Al 单质和少量 Al_2O_3 夹杂, 当合金为液态时, 由 Al、O 元素组成的氧化物夹杂率先析出, 形成 Al_2O_3 夹杂物^[8]。

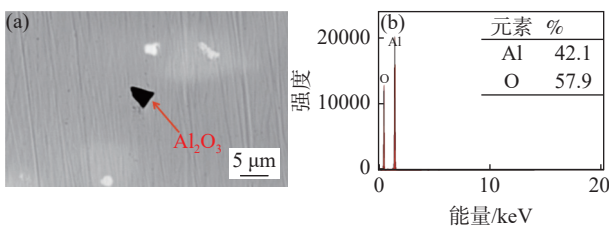


图 3 Al_2O_3 夹杂物形貌及能谱
Fig. 3 Morphology and energy spectrum diagram of Al_2O_3

由于 Al_2O_3 夹杂物硬度大难变形, 且形状上有尖角, 可作为疲劳裂纹的源头及扩展通道, 其含量的微量增加会严重降低合金的疲劳性能和持久寿命^[9]。所以, 应该严格控制原料纯净度, 优选低 Al 的铬原料, 尽量避免带入 Al 元素。

2.2 精炼期夹杂物形成机理分析

精炼样中主要包含 Al_2O_3 和 $MgAl_2O_4$ 两类夹杂

物, Al_2O_3 占比 89.08%, $MgAl_2O_4$ 占比 9.98%, $MgAl_2O_4$ 夹杂物形貌如图 4 所示, 其形貌近似球形, 平均直径约 $1 \mu m$ 。结合 VIM 精炼阶段可知, 由于高温高真空及电磁搅拌作用, Al 活泼元素可对 MgO 坩埚进行还原, 反应如式(1)^[10]所示, 产物为溶解 Mg 和粘附在坩埚内壁的 Al_2O_3 。由于连续的搅拌作用, 一部分附着在坩埚壁上的 Al_2O_3 颗粒被卷进合金液, 增加了合金液中 Al_2O_3 夹杂物的数量密度; 另一部分 Al_2O_3 与坩埚中的 MgO 反应, 生成 $MgAl_2O_4$, 如式(2)所示。 $MgAl_2O_4$ 熔点高($2\ 000 \sim 2\ 200 \text{ } ^\circ C$), 硬度大, 化学稳定性好, 通常作为其他夹杂物的异质形核核心, 降低其他夹杂物的形核功, 促进其他夹杂物的析出^[11]。

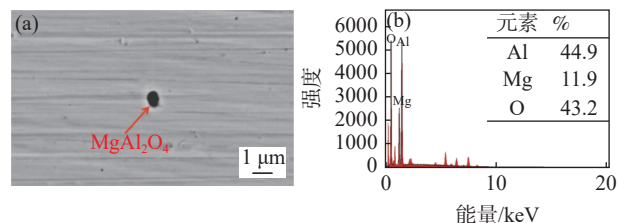
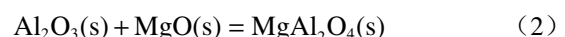
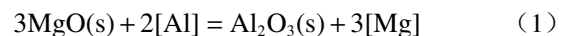


图 4 $MgAl_2O_4$ 夹杂物形貌及能谱
Fig. 4 Morphology of $MgAl_2O_4$

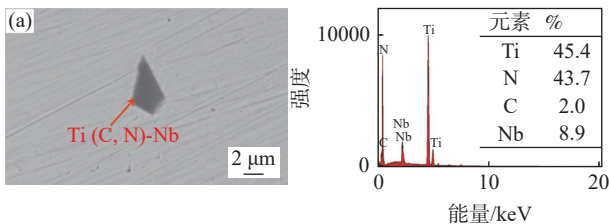


可通过调整精炼期工艺参数的方法, 适当降低精炼温度、真空度, 减缓 Al 对 MgO 坩埚的还原侵

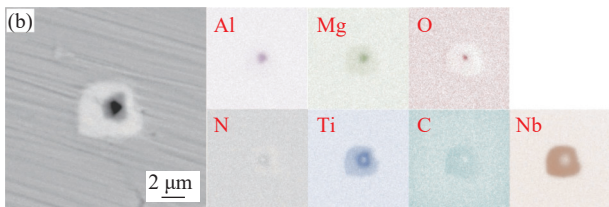
蚀,从而降低 $MgAl_2O_4$ 和 Al_2O_3 夹杂的含量。

2.3 加 Nb、Al、Ti 合金化后夹杂物形成机理分析

合金加 Nb、Al、Ti 合金化后样品中主要包含 Al_2O_3 、 $MgAl_2O_4$ 和 $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$ 三类夹杂物, Al_2O_3 占比 60.71%, $MgAl_2O_4$ 占比 12.66%, $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$ 占比 24.93%。图 5(a) 为 $Ti(C,N)-Nb$ 单层夹杂物形貌, 平均直径约 $6\ \mu m$, 含量极少, 可以忽略不计。图 5(b) 为 $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$ 夹杂物形貌, 平均直径约 $7\ \mu m$ 。 $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$ 是以 $MgAl_2O_4$ 为异质形核核心的三层复合夹杂物, 在 $MgAl_2O_4$ 核心外层包裹有一层 $Ti(C,N)$ 夹杂物, 其最外层是 NbC 。与精炼样对比, 加 Nb、Al、Ti 后过程样中 Ti 的夹杂物含量增多, Ti 主要以 $Ti(C,N)$ 的形式形成夹杂物^[12]; 而 Nb 元素与 C 结合, 在降温过程中以 NbC 形式析出。通过热力学软件计算可知, TiN 的开始生成温度为 $1416\ ^\circ C$, 其熔点低于 $MgAl_2O_4(2000\sim 2200\ ^\circ C)$, 在降温过程中 TiN 优先以氧化物夹杂为形核核心析出长大, 降低了 TiN 析出所需的过冷度, 所以 TiN 会在 $MgAl_2O_4$ 表面聚集长大; 后析出的 TiC 会在 TiN 表面聚集, 由于 TiC 和 TiN 均为 NaCl 型结构, 其晶格常数分别为 0.4241 、 $0.4329\ nm$, 致使两者在长大过程中较易固溶在一起, 从而形成 $Ti(C,N)$ 复合夹杂物, 且无明显形核核心区域^[13]。在凝固过程中, NbC 以 $MgAl_2O_4-Ti(C,N)$ 夹杂作为异质形核核心析出, 最后形成 $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$ 三层复合夹杂物。



(a) $Ti(C,N)-Nb$ 夹杂物形貌及能谱



(b) $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$ 夹杂物形貌及面扫结果

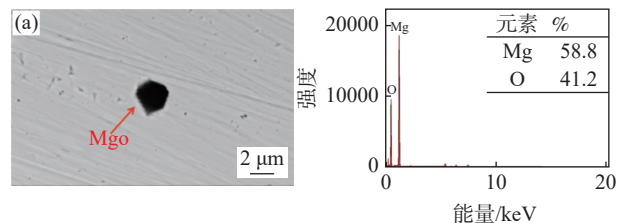
图 5 $Ti(C,N)-Nb$ 和 $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$ 夹杂物形貌
Fig. 5 Morphology of (a) $Ti(C,N)-Nb$ and (b) $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$

$MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$ 这类复合夹杂物的形成, 会消耗部分金属钛、金属铌, 减少 γ' 或 γ'' 相的含量,

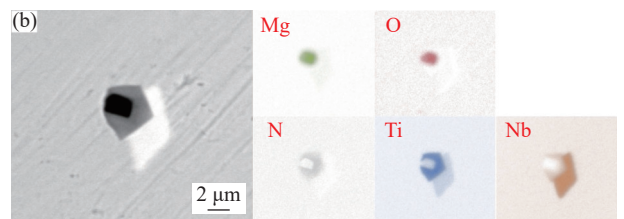
从而降低合金的高温强度。 $MgAl_2O_4$ 作为 $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$ 的形核核心, 要减少 $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$ 复合夹杂物, 必须减少 $MgAl_2O_4$ 的含量。所以, 应该在精炼期通过降低精炼温度、真空度来控制 $MgAl_2O_4$ 的含量。另外, 氮元素大部分从冶炼原材料 Cr 和 Nb 中引入。因此, 优选高纯净度原材料是减少高温合金中氮含量的最直接方法^[14]。

2.4 加 Mg 合金化后夹杂物形成机理分析

合金加入 Mg 合金化后样品中夹杂物主要包含 Al_2O_3 、 $MgAl_2O_4$ 和 $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$, 还存在少量 MgO 及其复合夹杂物 $MgO-Ti(C,N)-NbC$ 。 Al_2O_3 占比 57.37%, $MgAl_2O_4$ 占比 18.96%, $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$ 占比 18.81%, MgO 及其复合夹杂物 $MgO-Ti(C,N)-NbC$ 占比 3.87%。 MgO 及 $MgO-Ti(C,N)-NbC$ 夹杂物形貌如图 6 所示, MgO 近似方形, 其最大直径约 $3\ \mu m$; $MgO-Ti(C,N)-NbC$ 是以 MgO 为形核核心的三层复合夹杂物, 在 MgO 核心外层包裹有一层 $Ti(C,N)$ 夹杂物, 其最外层是 NbC , 其最大直径约 $8\ \mu m$ 。试验检测原材料成分结果可知, 原材料 Mg 中分布有大量 MgO 夹杂, 所以合金液在添加 Mg 后会带入 MgO 夹杂, MgO 作为 $Ti(C,N)$ 的形核核心, 促进 $MgO-Ti(C,N)-NbC$ 复合夹杂物的形成。



(a) MgO 夹杂物形貌及能谱



(b) $MgO-Ti(C,N)-NbC$ 夹杂物形貌及面扫结果

图 6 MgO 和 $MgO-Ti(C,N)-NbC$ 夹杂物形貌
Fig. 6 Morphology of (a) MgO and (b) $MgO-Ti(C,N)-NbC$

由以上分析可知, GH4169 真空感应过程夹杂物的演变机制如下: 在熔化期形成 Al_2O_3 夹杂物; 精炼期由于坩埚分解, 形成 $MgAl_2O_4$ 夹杂; 加 Nb、Al、Ti 合金化后, 形成 $MgAl_2O_4-Ti(C,N)-NbC$ 复合夹杂物; 加 Mg 后合金液中生成 MgO 及其复合夹杂物 $MgO-Ti(C,N)-NbC$ 。

2.5 熔炼过程夹杂物分布情况

图 7 和图 8 是过程样中夹杂物分布情况。通过图 7 可知, 随冶炼过程的进行, 夹杂物的数量密度呈明显的先增加后降低的变化趋势。熔清样中夹杂物数量密度 25.01 个/mm², 精炼结束后数量密度剧增到 211.42 个/mm², 精炼期产生的 MgAl₂O₄ 夹杂占比 10%, 主要夹杂物类型还是 Al₂O₃。通过上述分析可知, 在精炼期高温高真空条件下, 由于 Al 元素对 MgO 坩埚侵蚀还原, 所以夹杂物数量密度剧增。合金液中加入微量合金元素 Nb、Al、Ti 后, 夹杂物数量密度由 211.42 个/mm² 降低到 76.51 个/mm², 这是由于熔池中流场和夹杂物的运动特点, 使夹杂物发生相互碰撞、聚集、长大, 精炼期间形成的氧化物夹杂与 Al-Ti 深脱氧形成的氧化物夹杂上浮于液态金属表面或附着于坩埚壁进行去除, 从而使合金液中夹杂物数量减少^[15]。加入微量合金元素 Mg 后, 由于夹杂物的上浮去除, 随着冶炼过程的进行, 合金液中夹杂物数量进一步减少, 出钢前合金液中夹杂物数量密度 46.57 个/mm²。同理, 如图 8 所示, 随冶炼过程的进行, 夹杂物面积比(单位检测面积内夹杂物的面积总和, μm²/mm²)与数量密度有相同的变化趋势, 呈先增加后降低, 结果与之对应。

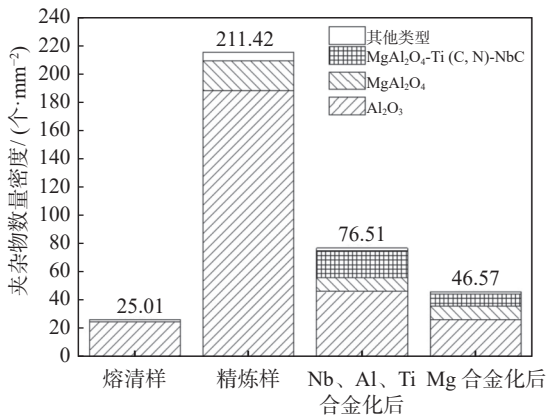


图 7 单位面积内不同类型夹杂物的数量
Fig. 7 Number of different types of inclusions per unit area

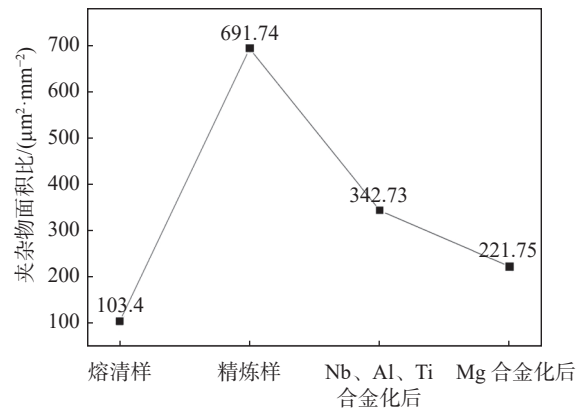


图 8 单位面积内夹杂物的面积总和
Fig. 8 The total area of inclusions per unit area

3 结论

1) 真空感应熔炼的 GH4169 中夹杂物类型主要有: Al₂O₃、MgAl₂O₄、MgAl₂O₄-Ti(C,N)-NbC、MgO 和 MgO-Ti(C,N)-NbC。在熔化期形成 Al₂O₃ 夹杂, 在精炼期形成 MgAl₂O₄ 夹杂; 加 Nb、Al、Ti 合金化后, 形成 MgAl₂O₄-Ti(C,N)-NbC 夹杂; 加 Mg 合金化后, 生成 MgO 和 MgO-Ti(C,N)-NbC 夹杂。

2) 随冶炼过程的进行, 夹杂物的数量密度和夹杂物面积比均呈明显的先增加后降低的变化趋势。在精炼期因坩埚被还原分解, 夹杂物数量密度达到峰值 211.42 个/mm²。精炼期结束后, 由于夹杂物上浮或附着于坩埚壁被去除, 使夹杂物数量呈下降趋势, 浇注前夹杂物数量密度为 46.57 个/mm²。

3) Al、Mg、N 杂质主要来源于冶炼原材料的不纯或真空感应炉中耐火材料的污染, 要减少 Al₂O₃、MgAl₂O₄ 和 TiN 夹杂物, 必须提高原材料的纯度; 且适当降低精炼期感应炉内精炼温度和真空度, 降低坩埚的侵蚀影响, 从而控制 MgAl₂O₄ 和 Al₂O₃ 夹杂的形成。

参考文献

[1] Ivanoff T A, Watt T J, Taleff E M. Characterization of solidification microstructures in vacuum arc remelted nickel alloy 718[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2019, 50(2): 700-715.

[2] Rao G A, Prasad K S, Srinias M, et al. Characterisation of hot isostatically pressed nickel base superalloy Inconel 718[J]. *Materials Science and Technology*, 2003, 19(3): 313-321.

[3] Whitmore L, Ahmadi M R, Guetaz L, et al. The microstructure of heat-treated nickel-based superalloy 718 plus[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2014, 610(29): 39-45.

[4] Gao Xiaoyong. Research on purification technology for the master ally of FGH96 powder superalloy[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020. (高小勇. FGH96粉末高温合金母合金的纯净化技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.)

[5] Wang Chong, Zeng Yanping, Xie Xishan. Influence of characteristic inclusion parameters on crack initiation and propagation

- ultra-high strength steels for aerospace application under tensile and low cyclic fatigue loading[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(5): 557-562.
(王冲, 曾燕屏, 谢锡善. 拉伸与低周疲劳载荷作用下夹杂物特征参数对航空用超高强度钢中裂纹萌生与扩展的影响[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(5): 557-562.)
- [6] Wang Di, Yang Shufeng, Qu Jinglong, *et al.* Distribution of inclusions on surface of GH4169 ESR ingot[J]. Iron and Steel, 2021, 56(2): 155-161.
(王迪, 杨树峰, 曲敬龙, 等. GH4169电渣重熔铸锭表层夹杂物分布规律[J]. 钢铁, 2021, 56(2): 155-161.)
- [7] Kong Haohao, Yang Shufeng, Qu Jinglong, *et al.* Type and distribution of inclusion GH4169 nickel based superalloy[J]. Acta Astronautica Sinica, 2020, 41(4): 304-311.
(孔豪豪, 杨树峰, 曲敬龙, 等. GH4169铸锭中夹杂物的类型及分布规律[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 304-311.)
- [8] Shi Anjun. Effect of supergravity on solidification and inclusion behavior of IN718 superalloy[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
(石安君. 超重力对IN718合金熔液凝固及夹杂物机制影响的基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.)
- [9] Shi Chengbin, Chen Xichun, Guo Hanjie, *et al.* Control of MgO center dot Al₂O₃ spinel inclusions during protective gas electroslag remelting of die steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2013, 44(2): 378-389.
- [10] Mu Haoyuan, Zhang Tongsheng, Fruehan Richard, *et al.* Reduction of CaO and MgO slag components by Al in liquid Fe[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49B(4): 1665-1674.
- [11] Gui Mingxi, Xu Qingbin. Mechanism of MgO thermit reduction reaction[J]. Foreign Refractories, 2006, 31(5): 45-50.
(桂明玺, 徐庆斌. MgO的Al热还原反应的机理[J]. 国外耐火材料, 2006, 31(5): 45-50.)
- [12] Tora A, Zhou Fei, Wu Ming H, *et al.* Characterization of non-metallic inclusions in superelastic NiTi tubes[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(5/6): 448-458.
- [13] Wei Wenqing, Liu Bingqiang, Jiang Junsheng, *et al.* Effect of heat treatment on microstructure and mechanical behavior of Nb-35Ti-4C alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(3): 777-782.
(魏文庆, 刘炳强, 姜军生, 等. 热处理对Nb-35Ti-4C合金微观组织和力学机制的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(3): 777-782.)
- [14] Yuan Chao, Guo Jianting, Li Gusong, *et al.* Effect mechanism and control of nitrogen in cast superalloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(4): 14.
(袁超, 郭建亭, 李谷松, 等. 铸造高温合金中氮的影响机理与控制[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(4): 14.)
- [15] Wang Ning, Gao Jinguo, Yang Shulei, *et al.* Numerical simulation of inclusions movement in vacuum induction melting[J]. China Metallurgy, 2021, 31(12): 20-26.
(王宁, 高锦国, 杨曙磊, 等. 真空感应熔炼中夹杂物运动机制数值模拟[J]. 中国冶金, 2021, 31(12): 20-26.)

编辑 唐肖

(上接第 137 页)

参考文献

- [1] Bhanu S R K, Castelli M G. A critical assessment of the mechanistic aspects in Haynes 188 during low-cycle fatigue in the range 25°C to 1000°C[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 28A: 347-361.
- [2] Editorial Committee of China Aviation Materials Manual. China aviation materials manual [M]. Beijing: China Standards Press, 2002.
(《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.)
- [3] Gabb T P, Webster H, Ribeiro G. Fatigue life of superalloy haynes 188 in hydrogen[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(8): 1687-1695.
- [4] Liu Hanwu, Yan Weidong, Yang Aimin, *et al.* Progress of simulation study on grain structure in solidification[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2003, 27(2): 1-3.
(刘汉武, 严卫东, 杨爱民, 等. 金属凝固过程晶粒组织模拟研究进展[J]. 机械工程材料, 2003, 27(2): 1-3.)
- [5] Zhao J C, Yan P. The effect of cooling rate of solidification on microstructure and alloy element segregation of as cast alloy 718[J]. Superalloy, 2001: 718.

编辑 邓淑惠