

· 冶炼与凝固 ·



高温合金电渣重熔过程中 Mg 元素迁移规律

高小勇¹, 任威旺¹, 张立峰²

(1 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2 北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100114)

摘要:微量元素 Mg 是影响高温合金热加工性能和高温服役性能的重要因素。研究了电渣重熔用渣料中 MgO 含量对高温合金中 Mg 含量的影响规律。当渣料中含有 MgO 时, 高温合金熔体中 Al 元素与熔渣中 MgO 发生高温氧化还原反应, 形成溶解 Mg 进入合金液中。当 MgO 含量较低时, 电渣锭中 Mg 元素分布比较均匀。随着渣料中 MgO 含量增加, 电渣锭中 Mg 含量增加; 但是铸锭不同位置的 Mg 含量差异增加。采用带有能谱仪的场发射扫描电镜对电渣重熔高温合金中夹杂物和碳化物进行了表征。最后, 基于渣-金反应理论对增 Mg 现象进行了热力学解释。

关键词:高温合金; 电渣重熔; Mg 含量; 渣-金反应

DOI:10.20057/j.1003-8620.2025-00107 中图分类号:TF142

Migration Law of Mg Element during Electroslag Remelting of Superalloys

Gao Xiaoyong¹, Ren Weiwang¹, Zhang Lifeng²

(1 School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao City, Hebei Province 066004, China;
2 School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Mg as the trace element is an important factor affecting the hot workability and high-temperature service performance of superalloys. The effect of MgO content in the slag for electroslag remelting on Mg content of a superalloy was investigated. Oxidation-reduction reaction took place at the interface between Al element in the molten superalloy and MgO in the molten slag at high temperatures, and dissolved Mg formed and then diffused into the molten alloy. The Mg content was evenly distributed in the case of low content of MgO in the slag. With the increasing of MgO content in the slag, the Mg content in the superalloy increased. However, the Mg content in different positions of the electroslag remelted ingot had a significant difference. Field emission scanning electron microscope equipped with energy dispersive spectrometer was used to characterize the inclusions and carbides. Thermodynamic analysis was conducted to explain the increasing of Mg content based on slag-metal reaction theory.

Key Words: Superalloy; Electroslag Remelting; Mg Content; Slag-metal Reaction

微量元素 Mg 对高温合金热加工性能和使用性能具有重大影响^[1-2]。Mg 在高温合金中是一种有益的微量元素。Mg 的作用主要表现在:(1)去除 O、S、P 等有害杂质,净化晶界;Mg 以原子状态偏聚于晶界^[3],降低了界面能,从而强化晶界,增加了界面结合力^[4];(2)富集于碳化物的相界面,控制晶界碳化物的形貌^[5],起到分散和细化碳化物的作用^[6];(3)进入 γ' 强化相中,增加 γ' 相的晶格常数^[6]。上述因素的综合作用结果使得 Mg 对合金的高温持久强度^[2]、蠕变性能^[7]及热塑性^[8-9]等均产生有利影响^[10-11]。不含镁的 GH1035 高温合金的持久时间约为 150 h;而加入微量 $w[\text{Mg}]$ (0.001 3%) 后,高温合金的持久时间达 250~300 h,而对持久伸长率没有明

显影响^[2]。朱强等^[12]应用俄歇能谱仪(AES)研究了 Ni-Cr-Co 基高温合金中微量 Mg 的偏析规律,发现偏析于晶界的 Mg 具有平衡偏析的特性;而且 Mg 在晶界上分布是不均匀的。高温合金中 Mg 的添加存在最佳值。对于不同成分的高温合金,其最佳 Mg 含量也不相同。对于 GH169 合金, $w[\text{Mg}]$ 应该控制在 0.005%~0.010%,不低于 0.004%^[9]。对于 $w[\text{C}]$ 较高 (0.13%~0.17%) 的 Mar-M247 高温合金,最佳 $w[\text{Mg}]$ 为 0.003%~0.005%^[13]。适量镁对 GH2036 合金晶界 MC 等相有细化、球化作用;还可促进块状 MC 向颗粒 M_{23}C_6 转化,使合金晶界强化,从而显著提高持久寿命^[14]。此外,添加 Mg 元素能够有效提高 K492M 高温合金流动性,同时,降低疏松缺陷^[15]。

基金项目: 国家自然科学基金(项目号 52274398)

作者简介: 高小勇(1984—),男,博士,副教授; E-mail: ga Xiaoyong@ysu.edu.cn; 收稿日期: 2025-04-16

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

目前,高质量的高温合金采用三联熔炼技术制备,即真空感应熔炼(VIM)+电渣重熔(ESR)+真空自耗重熔(VAR)。表1为高温合金中Mg含量以及制备方法的文献总结。Mg在高温合金中的加入方法主要包括两种:(1)在真空感应熔炼时加入;(2)在电渣重熔时加入。

VIM是制备高温合金的第一道熔炼工序,在精确控制合金元素成分、去除气体元素及有害元素等方面优势显著。但是在Mg含量的控制方面存在一定难度。一方面,高温下Mg的蒸汽压很高,因此,挥发倾向很大。Mg的挥发受到加Mg量、Ar压力、挥发温度及时间等的影响^[16]。另一方面,真空感应熔炼镍基高温合金过程MgO坩埚的分解会导致增Mg现象^[17]。高真空度和高的熔炼温度导致MgO坩埚剧烈分解,从而增加了合金中的氧和镁含量。为了稳定Mg的收得率及在合金中的均匀分布,通常采用Ni-Mg中间合金的形式加入^[18]。镁的平均收得率较低,仅为14.3%^[19]。在VIM条件下,加Mg后强搅拌会导致合金中氧化物夹杂大量增加,而不进行强搅拌又会导致Mg元素分布不均匀,因此,不建议在真空感应炉中添加Mg元素^[20]。

ESR精炼是实现镍基高温合金精炼和成型的关键工序,对后续加工起到直接影响。余静等^[11]的研究结果表明,在真空感应炉中冶炼GH49合金电极时完全可以不加Mg;采用在电渣重熔过程中用四元渣(64%CaF₂-19%CaO-10%Al₂O₃-7%MgO,质量分数)的方法,能够使合金获得一定Mg含量,可以避免由于加镁而带来的麻烦和原料的浪费。陈崇禧等^[21]研究了渣料成分、自耗电极中Al含量等对高温合金电渣锭中Mg含量的作用机理,提出了含Mg的GH36A合金电渣重熔时自耗电极中含有少量Al的必要性。朱勤天等^[20]建议在电渣重熔(ESR)过程中利用“渣-金反应”向合金中供Mg以满足含量要求。电渣重熔过程中Mg质量分数的控制主要是通过调控渣系中MgO含量^[18]。一般控制残余 $w[\text{Mg}] < 0.005\%$ 时,配MgO量为3%~5%,如GH4037、GH4169等合金;当残余 $w[\text{Mg}] > 0.01\%$,配MgO量为10%,如GH99、GH4169等合金。

关于微量Mg元素对高温合金的组织 and 性能的作用以及Mg在高温合金中的形态和分布等的研究较多,但是对Mg在电渣重熔过程的迁移规律研究很少。本文以一种高铝镍基高温合金为研究对象,研究电渣重熔过程中Mg的迁移规律,具有重要

意义。

1 实验材料及方法

以国内某企业2000 kg级真空感应熔炼炉制备的FGH96合金铸锭作为自耗电极,化学成分见表2,其中 $w[\text{Mg}] < 0.0005\%$ 。所有自耗电极来自同一炉真空感应熔炼,目的是保证化学成分的一致性。自耗电极的直径为 $\phi 75$ mm,长度为700 mm,质量约为25 kg。电渣重熔采用80 kg保护气氛电渣重熔炉,水冷铜结晶器的内径为 $\phi 120$ mm。渣料成分见表3,其中,CaF₂、Al₂O₃、CaO、MgO、TiO₂、CeO₂等原材料均为化学纯试剂。渣料中加入CeO₂的目的是获得微量稀土Ce含量,提高合金的使用性能。每炉电渣重熔用渣料重量为2 kg。配料后进行烘干保温直至开始电渣重熔。采用液态启动方式进行化渣。电渣重熔过程的二次电流为2000~3000 A,二次电压为45 V。电渣重熔后在电渣锭不同位置钻屑进行化学成分分析。使用ICP法分析钢中Mg和Al含量。在电渣锭高度位置的中部位置切取金相试样用于金相分析。在蔡司Sigma-300场发射扫描电镜下观察电渣锭中夹杂物和碳化物的形貌和成分等特征。

2 实验结果与讨论

2.1 高温合金中Mg含量变化规律

电渣锭中Mg元素含量变化如图1(a)所示。当渣料中含有MgO时,电渣重熔后Mg含量增加。当渣料中 $w[\text{MgO}]$ 较低时(3%),电渣锭不同高度位置的Mg含量分布比较均匀。当渣料中 $w[\text{MgO}]$ 增加至6%时,电渣锭不同高度位置的Mg含量均发生增加,但是存在差异。当 $w[\text{MgO}]$ 含量继续增加至12%时,电渣锭不同高度位置的Mg含量继续增加,而且差异变大;底部 $w[\text{Mg}]$ 高达0.015%。图1(b)为电渣重熔后高温合金中Al元素含量变化。电渣重熔后,Al含量降低;铸锭底部Al含量低于中部和顶部。随着渣料中MgO含量增加,电渣锭底部Al含量明显降低。

2.2 Mg在高温合金中存在形式

Mg在高温合金中主要以固溶态和夹杂物的形式存在。高温下Mg元素与O元素具有很强的化学结合力,因此,容易形成MgO夹杂物^[29]。在本研究中,自耗电极中夹杂物为不规则形状MgO-Al₂O₃, $w[\text{MgO}]$ 平均值为28.7%。采用不含MgO的渣料进行电渣重熔,夹杂物的成分和形状没有发生变化。

表 1 高温合金中 Mg 微合金化研究文献报道
Table 1 Study literature reports for Mg microalloying in superalloys

作者	合金牌号	w[Al]/%	w[Ti]/%	w[Mg]/%	熔炼技术和加入方式	年份
Ze-xin Quan 等 ^[11]	GH4099	2.09	1.13	0.008	合金粉末中含有 0.009% Mg	2025
Xu-ze Li 等 ^[17]	K465	5.7	2.6	0.001 2~0.004 6	VIM, 采用 MgO 坩埚	2024
Rui-zhi Gao 等 ^[22]	K4169	0.496	1.002	0.000 7~0.006 1	电阻炉加入 Ni-Mg 合金	2023
朱勤天等 ^[20]	GH4169	0.20~0.80	0.65~1.15	0.006 5	VIM, 采用 MgO 坩埚, 加入 Mg 合金	2023
张红亮 ^[19]	GH3625	0.3	0.3	0.014~0.079	MoSi ₂ 电阻炉, 加入镍镁合金	2022
张红亮 ^[19]	GH3128	0.5	0.5	0.008 4~0.013 0	MoSi ₂ 电阻炉, 加入镍镁钼合金	2022
Javad Teimouri 等 ^[23]	Inconel 718	0.48	1.05	0.004 6	VIM 加入 Ni-Mg 合金	2018
余乾 ^[24]	铸造高温合金	w[Al]+w[Ti]: 3.7~4.6		0.001 8~0.026	VIM 制备母合金锭, 再重熔浇注成试样	2006
刘祖林等 ^[14]	GH2036	0.004~0.30	0.03	0.000 2~0.016	电弧炉+ESR	1997
谢锡善等 ^[9]	GH169	0.48~0.68	0.96~1.04	0.002~0.018	VIM	1993
吕桂枝等 ^[8]	变形高温合金	1.55	3.15	0.001 9~0.003 6	VIM+VAR VIM	1992
赵从宝 ^[10]	GH33	0.66	2.47	0.001 5	VIM	1992
龚玉汉等 ^[25]	GH2036	0.10~0.22	-	0.004 0~0.006 8	电弧炉+电渣重熔。	1991
金农等 ^[7]	GH33	-	-	0.001~0.013	-	1990
朱金元等 ^[26]	GH33A	-	-	0.001 4~0.011	VIM+VAR、VIM	1989
余静等 ^[11]	GH49	3.7~4.4	1.4~1.9	0.006 2~0.019	VIM+ESR	1989
龚玉汉等 ^[5]	GH36	-	-	0.002 7~0.016	电炉熔炼后期加入镍镁合金, 然后用含镁的四元渣系进行重熔	1988
朱强等 ^[12]	Ni-Cr-Co	4.10	2.32	0.019	VIM+VAR	1988
陈崇禧等 ^[21]	GH36	0.32~0.62	-	0.003 0~0.006 8	VIM+ESR	1986
张济山等 ^[27]	GH698	1.630	2.600	0.005	VIM+VAR	1986
陈崇禧等 ^[28]	镍基高温合金	1.82~1.91	1.90~2.02	0.004 5~0.006 5	ESR	1984
庄景云等 ^[6]	镍基	1.6	2.6	0.000 5~0.50	VIM 加入 Mg	1984

表 2 高温合金化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of the superalloys %

Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Nb	C	Mg	Ni
16.24	13.12	3.91	3.87	3.75	2.17	0.82	0.03	<0.0005	余量

表 3 电渣重熔用渣料化学成分

Table 3 Composition of the slags for ESR

渣料编号	熔渣化学成分(质量分数)/%						MgO/Al ₂ O ₃ 比值
	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	CeO ₂	
Slag 1	55	20	20	0	2	3	0
Slag 2	55	17	20	3	2	3	0.17
Slag 3	55	14	20	6	2	3	0.43
Slag 4	55	8	20	12	2	3	1.50

采用含有 MgO 的渣料进行电渣重熔后, 夹杂物成分和尺寸发生变化: 夹杂物中 w[MgO] 平均值增加至 37.1%, 尺寸变小, 形貌接近球形, 如图 2(a) 所示。此外, 还发现部分夹杂物周围被碳化物(Ti-

Nb-Mo-W-C)、碳氮化物(Ti-Nb-Mo-W-C-N)包裹, 如图 2(b)、(c) 所示。这与张红亮^[19]的研究结果一致。Mg 加入高温合金中后, 部分 Mg 形成 MgAl₂O₄ 夹杂物, 能够为 MC 型碳化物提供非均匀形核核心, 从而细化和分散一次碳化物。此外, 加入微量 Mg 元素使得镍基变形合金中晶界连续条状碳化物转变成不连续的块状^[30]。

2.3 电渣重熔过程增 Mg 机理

电渣重熔精炼过程的特点是具有充分的渣-合金液接触界面: 自耗电极末端形成液膜阶段、熔滴下落阶段、金属液熔池与渣液接触界面, 而且熔炼温度很高。因此, 电渣重熔过程冶金反应的热力学与动力学条件均十分充足, 能够起到渣洗提纯的目的。

本研究中高温合金的 Al 含量很高, 在高温下能够与渣料中 MgO 发生反应, 形成溶解 Mg 进入合金

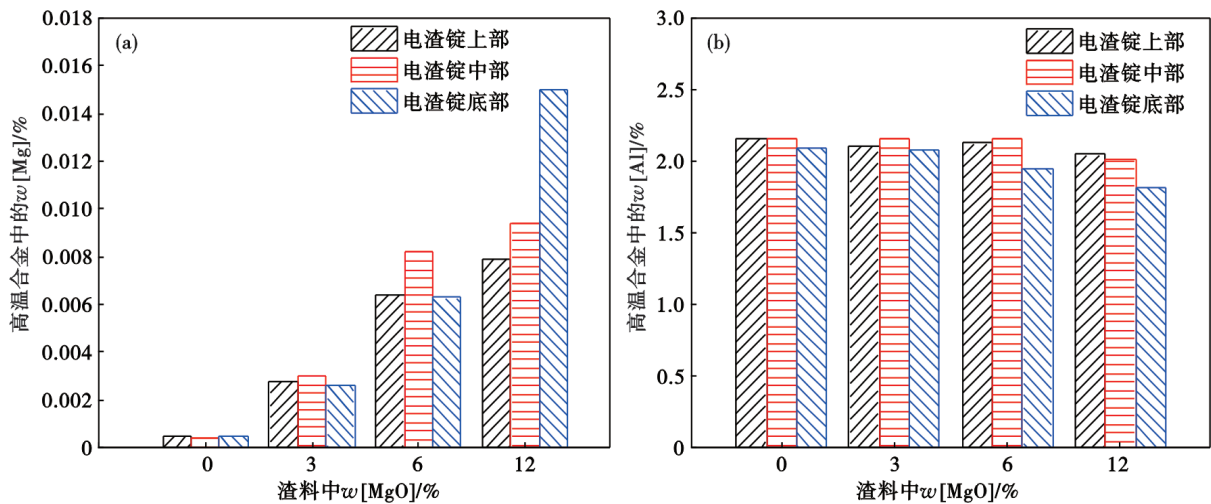


图 1 电渣锭中元素含量:(a) Mg 含量,(b) Al 含量

Fig. 1 Element contents in the electroslag remelted ingots: (a) Mg content, (b) Al content

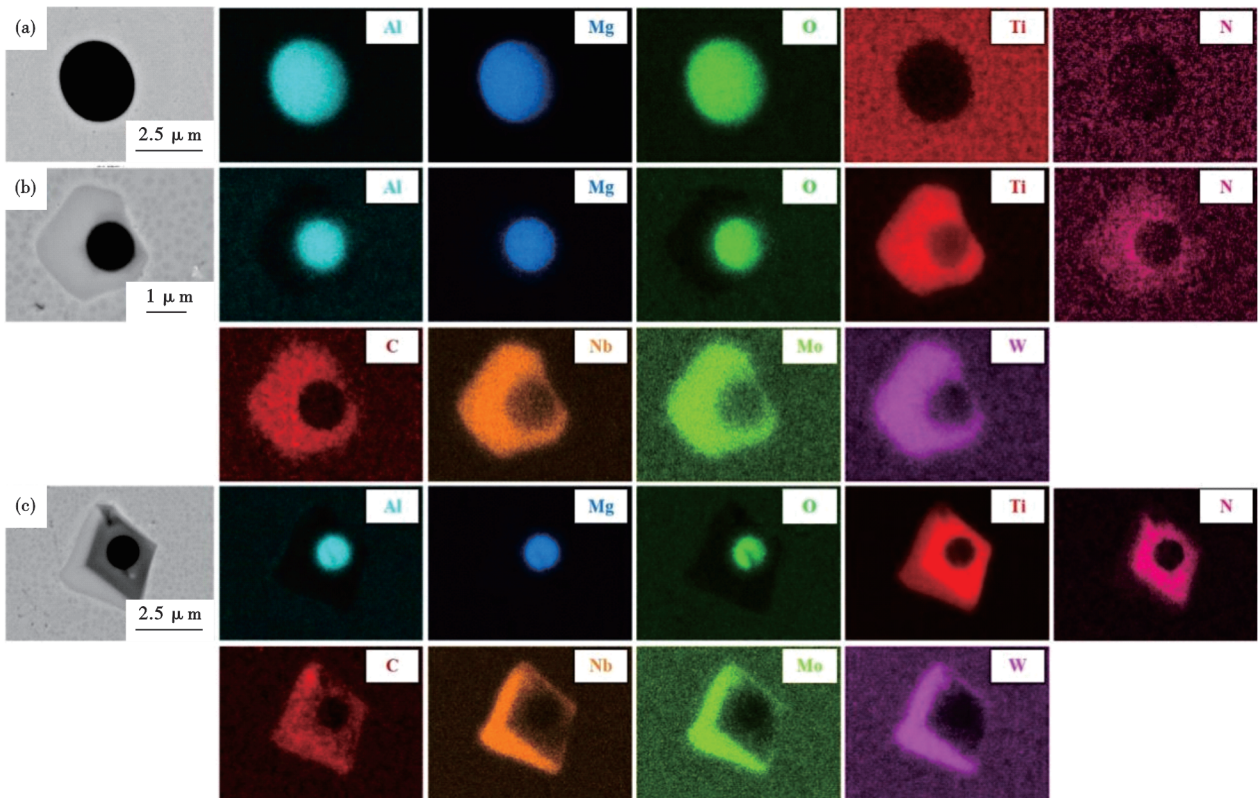


图 2 典型夹杂物和碳化物形貌和元素分布图:(a) MgO-Al₂O₃夹杂物,(b) 夹杂物-碳化物,(c) 夹杂物-氮化物-碳化物

Fig. 2 Morphology and element mapping of typical inclusions and carbides: (a) MgO-Al₂O₃ inclusion, (b) oxide-carbide, and (c) oxide-nitride-carbide

液中。根据电渣重熔前后高温合金中 Mg、Al 元素成分变化,分析认为电渣重熔过程的“渣-金反应”是主要原因。高温合金熔体中溶解 Al 元素和熔渣中 MgO 在合金-熔渣界面发生高温化学反应,产物为溶解 Mg 和 Al₂O₃。具体反应如公式(1)所示^[21]。该反应使得合金液中 Mg 含量增加。



陈光耀等^[31]认为在高温下,MgO 会发生分解形成 Mg。在 1 550 °C 高温下,MgO 坩埚耐火材料在高温合金熔体中会发生熔解-分解作用,释放出 O 原子,如公式(2)所示。 $w[O]$ 从反应前的 0.000 3% 增加至反应后的 0.001 1%。由于高温合金活泼元素

Al含量很高,Al会与MgO坩埚分解的O生成 Al_2O_3 ,进而促进MgO的溶解反应的发生,而增大对合金熔体的氧污染。但是该文献没有介绍反应前后高温合金熔体中Mg含量的变化。采用MgO基坩埚熔炼K465高温合金时,Mg含量随时间增加而增加;添加活性元素Al、Ti、Ce、Y后,Mg含量增加速率增大^[32]。

$$(MgO)_{slag} = [Mg]_{in\ melt} + [O]_{in\ melt} \quad (2)$$

进入合金液中的溶解Mg能够与钢液中的 Al_2O_3 夹杂物发生氧化还原反应,产物为MgO- Al_2O_3 。最终夹杂物转变为细小的MgO- Al_2O_3 ,在冷却和凝固过程中成为碳化物异质形核的有效核心。

影响高温合金电渣重熔过程Mg含量的工艺参数很多。陈崇禧等^[21]用热力学分析了GH36合金在含MgO或MgF₂渣系中电渣重熔合金中Si、Mn等成分对产生或保持合金中含有 $w[Mg] \geq 0.0020\%$ 的不可能性,提出了含Mg的GH36A合金电渣重熔时自耗电极中含有少量Al的必要性。而且研究了原始Al含量、原始Mg含量以及熔渣成分对电渣锭中Mg含量的影响^[21]。对于含Al的镍基高温合金,通过选择适当的渣系成分,可使电极母材中无Mg的合金电渣重熔后获得达到要求值的Mg含量^[28]。渣料中其他成分的变化也会影响电渣重熔过程Mg向合金

中的迁移。然而过多MgO加入会导致熔渣黏度上升^[33]。当 $w[MgO]$ 超过15%时,熔渣黏度升高较大^[34]。

本研究仅从渣料中MgO含量的变化来研究高温合金的Mg微合金化。而且采用的高温合金为时效强化型,Al含量较高,能够保证与渣料发生反应,从而提高高温合金中Mg含量。对于某些固溶强化型高温合金,Al含量较低,这时需要提高自耗电极中初始Al含量。但是对于具体的高温合金,其Al含量是确定的。这时就主要依靠渣料的成分调控来实现Mg合金化的目的。

3 结论

电渣重熔使得高温合金中Mg含量增加,可以实现元素Mg的微合金化。当渣料中含有 $w[MgO]$ 3%~6%时,合金液中溶解Al与熔渣中MgO发生高温反应,形成溶解Mg进入合金液中,而且产生的Mg含量较高,分布比较均匀。随着渣料中MgO含量增加,电渣锭中Mg含量增加,但是铸锭不同位置的Mg含量差异增加。本研究为其他高温合金通过电渣重熔控制Mg含量和实现Mg微合金化具有一定的指导作用。

参考文献

- [1] Quan Z X, Jia Q, Wang Z H, et al. Efficient improvement of high-temperature ductility in selective laser melted GH4099 superalloy by Mg microalloying and optimized heat treatment [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 927: 147837.
- [2] 郭建亭. 几种微量元素在高温合金中的作用与机理[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(3): 465-475.
- [3] 李玉清, 陈国胜, 刘锦岩, 等. 镁在高温合金中的晶界效应和作用机制[J]. *特殊钢*, 2000, 21(2): 8-12.
- [4] 可大年, 仲增墉. Mg在高温合金GH220中的作用[J]. *钢铁研究总院学报*, 1982(0): 116.
- [5] 龚玉汉, 肖荣仁, 张根良. 镁对GH36铁基合金组织和性能的影响[J]. *特殊钢*, 1988, 9(3): 9-16.
- [6] 庄景云, 金钦瀚, 杨锦炎, 等. 镁在一种高温合金中的分布和形态[J]. *钢铁研究总院学报*, 1984(3): 291-296.
- [7] 金 农, 仲增墉. Mg对高温合金蠕变性能及蠕变裂纹扩展的影响[J]. *钢铁研究学报*, 1990, 2(S1): 83-90.
- [8] 吕桂枝, 赵炳璧, 李树华, 等. Ca, Mg对镍基高温合金力学性能和热塑性的影响[J]. *钢铁研究学报*, 1992, 4(2): 63-67.
- [9] 谢锡善, 徐志超, 倪克铨. 镁微合金化GH169的研究与发展[J]. *北京科技大学学报*, 1993, 15(1): 25-30.
- [10] 赵从宝. 微量镁对GH33合金蠕变裂纹扩展行为的影响[J]. *航空材料学报*, 1992, 12(1): 8-11.
- [11] 余 静, 蔡 靖. GH49合金中镁对组织性能的影响[J]. *物理测试*, 1989, (1): 1-4.
- [12] 朱 强, 王 迪, 陈国良, 等. Ni—Cr—Co基高温合金中微量元素镁的偏析规律[J]. *北京钢铁学院学报*, 1988, 10(1): 12-17.
- [13] Bor H Y, Ma C Y, Chao C G. The influence of Mg on creep properties and fracture behaviors of Mar-M247 superalloy under 1255 K/20 [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2000, 31(5): 1365-1373.
- [14] 刘祖林, 向乐新, 王春麟, 等. 镁微合金化对GH2036合金晶界沉淀的影响[J]. *材料科学与工艺*, 1997, 5(1): 133-135.
- [15] 周煜晗, 杨文超, 张丽辉, 等. Mg元素对K492M高温合金流动性及疏松缺陷的影响[J]. *铸造技术*, 2025, 46(4): 354-361.
- [16] 陈恩普, 苏肇乾, 傅 杰, 等. Ni基高温合金真空感应熔炼过程中Mg挥发动力学[J]. *金属学报*, 1984, 20(1): 71-77.
- [17] Li X Z, Feng H, Li H B, et al. Deoxidation of nickel-based superalloy using carbon under high vacuum degree [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2024, 55(6): 4503-4517.
- [18] 董 健. 镁在高温合金中的作用及控制[J]. *黑龙江冶金*, 2009, 1(4): 8-9.
- [19] 张红亮. 镁处理对GH3625和GH3128合金碳化物的影响研究

- [D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- [20] 朱勤天, 朱 贺, 李乐松. GH4169 合金真空感应熔炼过程中夹杂物演变规律研究[J]. 江西冶金, 2023, 43(3): 224-231.
- [21] 陈崇禧, 傅 杰, 胡尧和, 等. GH36A 合金电渣重熔 Mg 含量的控制[J]. 北京钢铁学院学报, 1986, 8(2): 52-58.
- [22] 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.
- [23] Teimouri J, Hosseini S R, Farmanesh K. Effect of magnesium and calcium addition on carbides characterizations and anisotropy ductile fracture of inconel 718 [J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2018, 7(3): 268-276.
- [24] 余 乾. 微量元素 C 和 Mg 对一种镍基高温合金组织和力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2006, 26(4): 11-13.
- [25] 龚玉汉, 李玉清. 高温长时效后 GH2036M 合金中的碳化物和持久蠕变性能的稳定性[J]. 特殊钢, 1991, 12(6): 20-23+28.
- [26] 朱金元, 潘真赐, 郭恩庭. 不同含量的 Mg 对 GH33A 合金蠕变性能的影响[J]. 特殊钢, 1989, 10(3): 39-43.
- [27] 张济山, 杨王玥, 陈国良, 等. 微量元素 Mg 对 GH698 高温合金蠕变疲劳及其交互作用的影响和机制的研究[J]. 北京钢铁学院学报, 1986, 8(1): 33-44.
- [28] 陈崇禧, 高荣富, 赵文祥. 熔渣成分对电渣重熔 Ni 基高温合金中 Mg, Al, Ti 含量的影响[J]. 金属学报, 1984, 20(3): 243-251.
- [29] 李 靖, 蒋世川, 戚慧琳, 等. GH4169 真空感应过程夹杂物的演变机制[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(3): 159-164.
- [30] 可大年, 仲增墉. Mg 对镍基高温合金蠕变性能的影响[J]. 金属学报, 1983, 19(5): 377-384.
- [31] 陈光耀, 廖厚劲, 邓少文, 等. 氧化镁坩埚与镍基高温合金界面反应机理[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(12): 3832-3840.
- [32] 刘东方, 姜 华, 丁 琪, 等. 坩埚材质对 K465 合金真空感应熔炼过程痕量元素影响规律[J]. 铸造, 2022, 71(12): 1495-1498.
- [33] 杨康帅. CaF₂-CaO-Al₂O₃-MgO-TiO₂ 基低氟渣系粘度及结构特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [34] 朱智洪. TiO₂ 渣系对 Incoloy825 合金中 Al/Ti 含量及夹杂物影响的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.