

# 稀土元素 Ce 对 GH4220 合金凝固过程中元素偏析和相析出行为的影响

李晓含<sup>1, 2</sup>, 安宁<sup>3</sup>, 李佳锡<sup>1</sup>, 谭政<sup>2</sup>, 刘伟华<sup>2</sup>,  
贾丹<sup>2</sup>, 宁礼奎<sup>2</sup>, 信昕<sup>2</sup>, 刘恩泽<sup>2</sup>

(1. 沈阳化工大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110142; 2. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学  
国家研究中心, 辽宁沈阳 110016; 3. 北京北冶新材料股份有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 研究了稀土元素 Ce 对 GH4220 合金凝固过程中元素偏析和相析出行为的影响规律, 结果发现合金中加入 0.005 1% 的 Ce 元素对合金凝固组织及元素分布规律存在较大影响。凝固初期, Ce 偏聚于固液界面, 降低了固液界面能, 提升了枝晶干  $\gamma$  基体形核率, 细化了枝晶干, 提高了 Mo、Al 和 Ti 元素在枝晶干  $\gamma$  基体中的含量, 降低了枝晶间的面积。凝固中后期, Ce 元素偏聚于枝晶间最后凝固区域, 提高了枝晶间  $\gamma$  基体中 W 的含量, 降低了最后凝固区域 Mo 和 Ti 的含量, 抑制了  $\mu$  相和  $\gamma$ - $\gamma'$  相的析出, 促进了 NiCe 相、CeS 相及 MC 碳化物的析出。此外, Ce 元素还降低了晶界二次  $\mu$  相的数量和尺寸, 提高了枝晶干二次  $\gamma'$  相的数量, 降低了二次  $\gamma'$  相的尺寸。

**关键词:** 高温合金; 稀土元素 Ce; GH4220 合金; 凝固; 元素偏析; 相析出

**中图分类号:** TG146.15; TG113.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 06-0670-06

**DOI:** 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0086

## Effects of Rare Earth Element Ce on the Elemental Segregation and Phase Precipitation Behaviors of GH4220 Superalloy During Solidification Process

LI Xiao-han<sup>1, 2</sup>, AN Ning<sup>3</sup>, LI Jia-xi<sup>1</sup>, TANG Zheng<sup>2</sup>, LIU Wei-hua<sup>2</sup>,  
JIA Dan<sup>2</sup>, NING Li-kui<sup>2</sup>, XIN Xin<sup>2</sup>, LIU En-ze<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, Liaoning, China;  
2. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016,  
Liaoning, China; 3. Beijing Beiyue Advanced Materials Co., Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** The influence laws of rare earth element Ce on the elemental segregation and phase precipitation behaviors during solidification process of GH4220 superalloy were systematically investigated. The results demonstrated that the addition of 0.005 1% Ce significantly influences the solidification microstructure and elemental distribution rule of the alloy. At the initial stage of solidification, Ce segregated at the solid-liquid interface, lowering the solid-liquid interfacial energy and promoting the nucleation rate of  $\gamma$  matrices within the dendrite trunks. This resulted in refinement of the dendrite trunks, increased the concentrations of Mo, Al and Ti elements in the  $\gamma$  matrices of dendrite trunks, and decreased the interdendritic area. During the intermediate and terminal stages of solidification, Ce preferentially segregated to the final solidification zones within interdendritic regions, increasing the concentration of W in the interdendritic  $\gamma$  matrix, reducing the concentrations of Mo and Ti in the terminal solidification zones, suppressing the precipitation of  $\mu$  phase and  $\gamma$ - $\gamma'$  phase, and promoting the precipitation of the NiCe phases, the CeS phases and the MC carbides. Furthermore, the addition of element Ce also reduced both the quantity and sizes of secondary  $\mu$  phases precipitated at grain boundaries, increased the quantity of secondary  $\gamma'$  phases within the dendrite trunks, and decreased the sizes of the secondary  $\gamma'$  phases.

**Key words:** superalloy; rare earth element Ce; GH4220 alloy; solidification; elemental segregation; phase precipitation

**基金项目:** 宁波市科技计划项目 (2025Z021)。

**收稿日期:** 2026-03-06 收到初稿, 2026-04-16 收到修订稿。

**作者简介:** 李晓含 (2001-), 女, 硕士, 主要研究方向为变形高温合金。E-mail: xhli24h@imr.ac.cn

**通信作者:** 信昕, 男, 副研究员, 博士, 硕士生导师。电话: 024-83970735, E-mail: xxin@imr.ac.cn

李佳锡, 男, 讲师, 博士, 硕士生导师。电话: 024-89388092, E-mail: jiaxili@syuct.edu.cn

**引用格式:** 李晓含, 安宁, 李佳锡, 等. 稀土元素 Ce 对 GH4220 合金凝固过程中元素偏析和相析出行为的影响 [J]. 铸造, 2026, 75 (6): 670-675.

LI Xiaohan, AN Ning, LI Jiaxi, et al. Effects of rare earth element Ce on the elemental segregation and phase precipitation behaviors of GH4220 superalloy during solidification process [J]. Foundry, 2026, 75 (6): 670-675.

GH4220合金为Ni-Co-Cr基时效强化变形合金,通过添加较高的W、Mo、Al和Ti等强化元素,使其在900~950 °C高温环境下具有较高的强度、抗蠕变和抗氧化能力<sup>[1-4]</sup>,被应用于制造涡轮叶片,是航空发动机中处于高温、复合应力下使用的关键部件<sup>[5-6]</sup>。对于GH4220合金的研究较少,且主要集中于长期时效后合金组织变化,元素W、Mo、Al、Ti、Mg和C等对合金热处理后析出相的影响等方面;对其制备前端的铸锭熔炼、均质化工艺和热变形规律等方面鲜有报道<sup>[7-12]</sup>。因此,系统研究GH4220合金的铸态组织特征,精确表征其凝固过程中的相析出行为和元素偏聚规律等是建立和优化其均质化热处理制度、制定合理热加工工艺不可或缺的前提。同时,研究表明在高温合金中引入稀土元素对合金的组织及性能具有重要影响<sup>[13]</sup>。其中,Ce作为一种常见的稀土添加元素,也常用于改善合金组织性能<sup>[14-17]</sup>。Ce元素加入可以细化晶粒,有效降低O、S等杂质元素含量,改善碳化物的尺寸和分布,提高力学性能等<sup>[18]</sup>。对于Ce元素对高温合金凝固过程元素偏析的影响存在一定差异,Rong<sup>[14]</sup>、Pan<sup>[19]</sup>等人认为Ce会加剧铸造镍基高温合金及GH742合金凝固过程中Nb和Ti在液相中偏析,而刘生在添加Ce的GH4169合金中发现,Ce的加入使枝晶间距减小而使合金元素的偏析范围减小,仅使得局部Nb的偏析程度加剧<sup>[20]</sup>。由此可见Ce在不同的高温合金体系中其作用机制不尽

相同,目前未见Ce在GH4220合金中作用机理报道,有必要进行深入研究。本课题研究了加入0.005 1% Ce对GH4220合金凝固过程中元素偏析和相析出行为的影响,以进一步揭示Ce元素在不同高温合金体系中的作用机制,为实现Ce的有效控制提供理论依据。

## 1 试样制备与方法

采用真空感应炉冶炼2个35 kg铸锭,合金1不添加元素Ce,合金2添加0.005 1%的元素Ce,控制合金其他元素加入量与冶炼参数相同,熔炼后的合金成分如表1所示。在各个铸锭靠近冒口端向下15 mm的中心部位切取10 mm × 10 mm × 10 mm的试样。对试样经径向观察面进行磨抛,之后用5 g柠檬酸+15 g硫酸铵+500 mL水腐蚀液电解腐蚀观察面,腐蚀时间25~30 s。取两合金铸锭相同位置切20 mm × 20 mm × 20 mm试样各3块,采用马弗炉将试样加热至1 420 °C × 20 min使其熔化后炉冷到1 380 °C,保温20 min后迅速水冷,对试样观察面进行磨抛腐蚀后进行观察。采用光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)对样品的组织进行观察。通过扫描电镜能谱分析(EDS)确定析出相成分。通过电子探针(EPMA)对不同视场中的枝晶干和枝晶间元素组成进行定量分析,每个区域测试数据不低于5个并取平均值进行统计。利用Image J分别对枝晶干和枝晶间的 $\gamma'$ 相尺寸进行统计,分析视场不低于5个。

表1 GH4220合金化学成分  
Tab. 1 Chemical composition of the GH4220 alloy

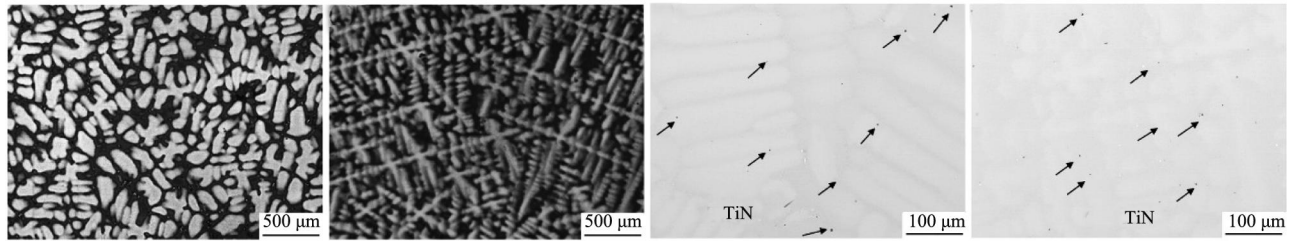
项目	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	V	Ce	Ni
合金 1	0.007 7	10.21	14.59	5.84	5.93	4.30	2.46	0.54	< 0.000 5	余量
合金 2	0.012	10.35	14.68	5.75	6.04	4.38	2.56	0.54	0.005 1	余量

## 2 试验结果及分析讨论

### 2.1 合金的铸态组织

图1为试验合金的铸态组织,两个合金均为典型的枝晶组织。图1(a)和(b)中白色区域为枝晶干,黑色区域为枝晶间,合金1的枝晶干较为粗大,枝晶间区域面积较大,且二次枝晶发育明显,如图1(a)所示。加入Ce的合金2枝晶干明显细化,枝晶间所占面积也相对较小。Ce的加入可减小枝晶干尺寸,降低枝晶间的面积。图1(c)和(d)为试验合金抛光后未腐蚀组织,明显观察到两合金均在枝晶干及枝晶间零星分布着一种黑色析出相,根据EPMA测得其富集Ti和N元素,且元素原子分数接近1:1,确定其为TiN,Ce的加入对TiN尺寸和数量影响不明显。

图2为合金铸态组织中的枝晶间析出相形貌,表2为EDS测试的各析出相平均原子分数。结果表明,不含Ce元素的合金1枝晶间组织由不规则的白亮相、块状灰暗色相、菊花状析出相及其周围的 $\gamma$ 基体组成,如图2(a)所示。不规则白亮相含Mo、W、Cr、Co、Ti和Ni元素,其原子百分比接近(Co, Ni, Cr)7(W, Mo, Ti)6,为一次析出的 $\mu$ 相。灰暗色块状析出相富集C、Ti、Mo和W元素,为一次MC碳化物(图3)。菊花状析出相则富集Al、Ti和Ni元素,为 $\gamma-\gamma'$ 共晶相。加入稀土元素Ce的合金2枝晶间相析出差异较为明显,如图2(b)-(d)所示,在枝晶间未观察到 $\mu$ 相和 $\gamma-\gamma'$ 共晶相,而是析出了块状的MC碳化物和在其周围或核心析出的富Ce白亮相。其中富Ce白亮相还含有较高的Ni和P元素,推测其为NiCe相<sup>[14]</sup>。合金2中的



(a) 合金1腐蚀组织

(b) 合金2腐蚀组织

(c) 合金1未腐蚀组织

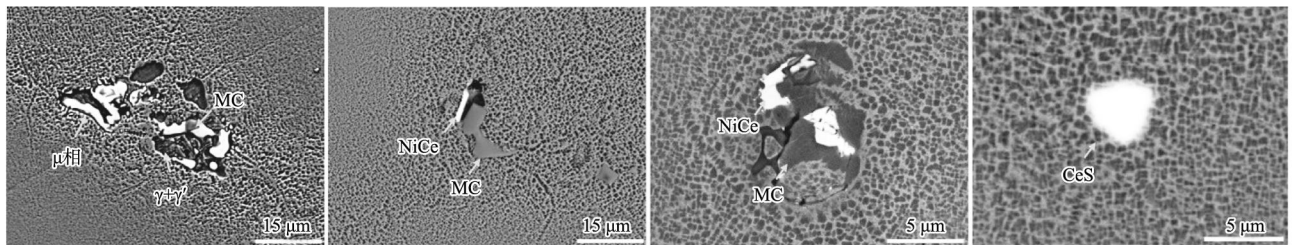
(d) 合金2未腐蚀组织

图1 Ce含量对合金枝晶组织的影响

Fig. 1 Effect of Ce content on the dendritic microstructure of the alloy

表2 能谱分析测试析出相成分  
Tab. 2 Chemical composition of precipitation by EDS

项目	相组成	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Ce	Ni	C	P	S	at. %
合金1	$\mu$	20.30	16.33	29.68	4.63	3.62	—	—	25.43	—	—	—	
	MC	—	—	16.88	5.89	55.07	—	—	3.79	18.36	—	—	
	$\gamma-\gamma'$	3.37	9.60	—	—	11.89	7.50	—	67.63	—	—	—	
合金2	MC	—	—	16.98	7.11	59.01	—	1.46	2.56	12.89	—	—	
	NiCe	—	—	—	—	—	—	40.68	36.86	—	22.46	—	
	CeS	—	—	—	—	—	—	52.31	—	—	—	47.69	



(a) 合金1

(b) 合金2

(c) 合金2

(d) 合金2

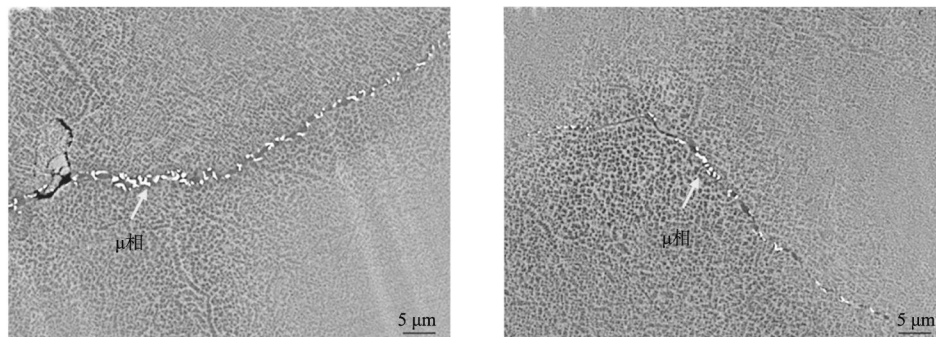
图2 铸态合金枝晶间析出相分布

Fig. 2 Distribution of precipitates in the interdendritic region of the as-cast alloy

MC碳化物尺寸大于合金1, 且其成分W、Ti含量略高于合金1, 而C元素略低于合金1, 值得注意的是该相还含有平均原子分数为1.46%的Ce元素。此外在枝晶间部分区域还可观察到独立析出的CeS相, 在其周围无 $\mu$ 相和

NiCe相析出。上述结果说明, Ce元素偏聚于凝固过程后期枝晶间的析出相中, 对相析出存在明显的影响。

在两个合金的晶界处都观察到了颗粒状析出的二次 $\mu$ 相, 如图3所示。由图可知, 未添加Ce元素的合金



(a) 合金1

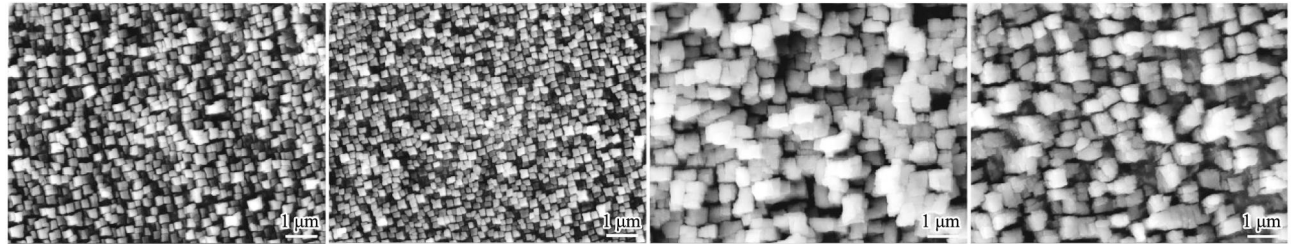
(b) 合金2

图3 Ce含量对试验合金晶界析出相形貌影响

Fig. 3 Effects of Ce contents on the morphologies of grain boundary precipitates in the test alloys

1晶界 $\mu$ 相尺寸略大,呈链状或片状析出于晶界,数量较多;添加Ce元素的合金2晶界 $\mu$ 相尺寸和数量都明显减小,分布也更为弥散。在合金的枝晶干和枝晶间还可观察到弥散析出的二次 $\gamma'$ 相,如图4所示。两个合金枝晶干区域的 $\gamma'$ 相尺寸皆明显小于枝晶间的 $\gamma'$ 相尺寸。其中合金1中枝晶干和枝晶间 $\gamma'$ 相平均尺寸分别为0.22  $\mu\text{m}$ 和0.44  $\mu\text{m}$ ,合金2枝晶干和枝晶间 $\gamma'$ 相平均尺

寸则分别为0.18  $\mu\text{m}$ 和0.42  $\mu\text{m}$ ,即合金2枝晶干 $\gamma'$ 相细于合金1,说明Ce元素对枝晶干区域 $\gamma'$ 相具有细化作用。统计还发现,Ce元素的加入使得合金枝晶干区域 $\gamma'$ 相面积分数由46.79%提高至53.37%,枝晶间区域 $\gamma'$ 相面积分数无明显变化,表明Ce的添加还可提升枝晶干 $\gamma'$ 相总体积分数。



(a) 合金1枝晶干

(b) 合金2枝晶干

(c) 合金1枝晶间

(d) 合金2枝晶间

图4 Ce含量对合金枝晶干以及枝晶间 $\gamma'$ 尺寸及面积的影响Fig. 4 Effect of Ce contents on the sizes and areas of  $\gamma'$  phases in both dendrite trunks and interdendritic regions

## 2.2 元素偏析

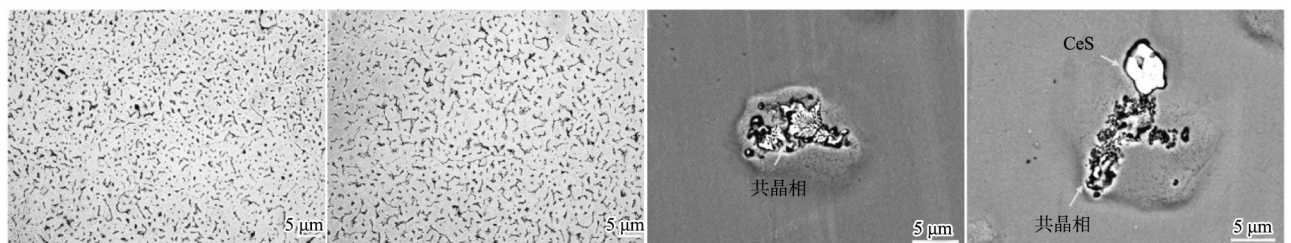
表3为EPMA测试的试验合金枝晶干区域和枝晶间区域基体的平均元素质量分数结果,并通过计算得到了偏析系数 $k$ ( $k$ 为元素枝晶干与枝晶间含量的比值)。 $k > 1$ 为负偏析元素,表明元素在枝晶干富集; $k < 1$ 为正偏析元素,表明元素在枝晶间富集; $k$ 越偏离1,说明

偏析越严重。由结果可知,合金中W和Co元素 $k > 1$ ,为负偏析元素,其中W元素的 $k$ 值最大,表明W元素在枝晶干偏析严重;Ti、Mo和Al元素 $k < 1$ ,为正偏析元素,其中Ti元素 $k$ 值最小,表明Ti元素在枝晶间偏析严重;Ni和Cr元素的 $k \approx 1$ ,偏析程度较低。对比可知,两个合金中W的 $k$ 值差异最大,分别为1.83(合金1)和1.55(合金2),Ce提高了枝晶间基体中W的含量。Mo、Al和Ti元素的 $k$ 值也存在一定的差异,Ce元素提高了这几种元素在枝晶干的含量,降低了其在枝晶间基体中的含量。

表3 电子探针测试枝晶干和枝晶间的成分  
Tab. 3 Compositions of dendrite trunks and interdendritic zones detected by EPMA  $w_B/\%$

项目	元素	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ni
合金1	枝晶干	10.60	15.55	4.58	6.61	3.53	1.65	57.48
	枝晶间	10.47	13.76	6.61	3.62	3.99	3.85	57.70
	$k$	1.01	1.13	0.70	1.83	0.88	0.43	1.00
合金2	枝晶干	10.97	15.63	4.83	6.46	3.67	1.82	56.62
	枝晶间	10.97	14.11	6.25	4.16	3.9	3.74	56.87
	$k$	1.0	1.10	0.77	1.55	0.98	0.49	1.00

由于两个合金枝晶间析出相存在较大差异,而该区域为合金凝固后期形成。为了弄清枝晶间第二相析出前Ce对合金凝固过程元素偏聚行为的影响,开展了高温熔化后的快速水淬试验。图5为两个合金熔化后降温至1 380  $^{\circ}\text{C}$ 水冷组织。此时枝晶干和枝晶间的基体已经凝固,枝晶间区域除合金2中已经形成块状CeS外,其他析出相都为细碎的共晶相,该细碎共晶相即为水



(a) 合金1

(b) 合金2

(c) 合金1

(d) 合金2

图5 Ce含量对合金凝固过程枝晶组织的影响

Fig. 5 Effect of Ce contents on the dendritic microstructures of the alloys during solidification processes

冷前未完成凝固的残余液相组织。对残余液相成分进行了EPMA成分分析发现,合金2未凝液体中的Mo明显低于合金1,说明Ce降低了未凝液相中Mo的含量。

### 2.3 分析讨论

由图1的结果可知,Ce元素细化了枝晶干,且减少了枝晶间面积,这主要是由于Ce元素作为典型的稀土表面活性元素,其原子半径(0.182 nm)远大于Ni原子(0.124 nm),在0.005 1%Ce的微量添加量下,几乎不固溶于 $\gamma$ -Ni基体,而是优先偏聚于凝固过程中的固液界面处<sup>[14]</sup>。固液界面处的Ce原子可显著降低固液界面能,根据形核理论,临界形核功与界面能的平方成正比,界面能的降低直接减小了 $\gamma$ 相的临界形核功,使合金凝固初期的形核率大幅提升。大量新晶核同步生长时相互制约,有效抑制了枝晶沿热流方向的择优延伸,不仅细化了枝晶干尺寸,还增加了枝晶密度,进而压缩了枝晶间残余液相的空间,导致枝晶间区域面积减小。此外,表3的结果也表明,Ce通过界面偏聚改变了W、Mo、Al和Ti元素的溶质分配规律,使Mo、Al和Ti元素更多保留在枝晶干的 $\gamma$ 基体中,W更多保留在枝晶间的 $\gamma$ 基体中。值得注意的是,两合金中TiN相的尺寸和数量无明显差异,这是因为TiN为高熔点相,在合金熔化阶段即已形核,而Ce元素主要在凝固过程中发挥作用。

在凝固中后期,Ce元素因偏聚效应向枝晶间区域富集,进而对枝晶间析出相的类型、形貌和成分产生明显的影响。未添加Ce的合金1中,枝晶间残余液相中富集的Mo、W、Ti和Al等元素满足 $\mu$ 相、MC碳化物和 $\gamma$ - $\gamma'$ 共晶相的形核条件,形成了多种析出相共存的状态。而Ce的加入打破了这种成分平衡,Ce聚集于残余液相中,降低了残余液相中Mo、Ti的含量,提高了Al含量(表4),导致枝晶间液相中元素的浓度无法达到 $\mu$ 相和 $\gamma$ - $\gamma'$ 共晶相形核的临界阈值,进而抑制了这两种相的析出,促进了富Ce的NiCe相、CeS相及固溶Ce元素的MC碳化物的析出<sup>[21]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册 [M]. 2版. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [2] 何玉怀, 苏彬. 中国航空发动机涡轮叶片用材料力学性能状况分析 [J]. 航空发动机, 2005 (2): 51-54.
- [3] 程体娟, 甘斌, 于鸿森, 等. 固溶处理对新型镍基高温合金组织及性能的影响 [J]. 金属热处理, 2022, 47 (3): 107-112.
- [4] 樊开伦, 宋文俊, 戴爱丽, 等. 固溶冷却方式对GH4220合金螺栓力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2022, 47 (6): 111-114.
- [5] 陈民芳, 由臣. 激光快速熔凝消除GH220合金渗层下针状相的

表4 高温熔化后1 380 °C水淬未凝液体区域化学成分  
Tab. 4 Chemical compositions of the un-solidified liquid regions after melting at 1 380 °C followed by water quenching  $w_B$  /%

项目	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ni
合金1	10.92	11.71	14.52	4.92	4.97	6.04	46.92
合金2	10.88	12.02	13.35	4.88	5.34	5.62	47.91

随着温度的继续降低,二次 $\mu$ 相和 $\gamma'$ 相从 $\gamma$ 基体中析出,Ce元素对这两种析出相亦有影响。对于晶界二次 $\mu$ 相,未添加Ce的合金1中,晶界处Mo和W元素的严重偏聚为 $\mu$ 相的大量形核与长大提供了条件,使其呈链状或片状分布且尺寸较大;而Ce元素优先偏聚在晶界处,不仅阻碍了Mo和W元素向晶界的进一步扩散,还减少了 $\mu$ 相的形核位点,从而使合金2中晶界二次 $\mu$ 相尺寸减小、数量减少且分布更弥散<sup>[22]</sup>。对于二次 $\gamma'$ 相,其形核与生长依赖于Al和Ti元素的含量,Ce的加入提高了枝晶干区域Al和Ti元素的含量,同时细化的枝晶干提供了更多形核位点,使得合金2枝晶干 $\gamma'$ 相尺寸更细、面积分数显著提升,而枝晶间区域Al和Ti元素含量无明显变化,因此枝晶间 $\gamma'$ 相面积分数未发生显著改变<sup>[23]</sup>。

## 3 结论

(1) Ce元素在凝固初期偏聚于固液界面处,提高了Mo、Ti和Al元素在枝晶干 $\gamma$ 基体中的含量,降低了固液界面能,提升枝晶干 $\gamma$ 基体形核率,细化枝晶干,减少枝晶间面积。

(2) Ce元素在凝固中后期偏聚于枝晶间最后凝固区域,改变了W、Mo、Ti和Al元素的偏析分配规律,抑制了枝晶间 $\mu$ 相和 $\gamma$ - $\gamma'$ 相的析出,促进了NiCe相、CeS相及MC碳化物的析出。

(3) Ce元素对二次析出相亦有影响。降低了晶界二次 $\mu$ 相的数量和尺寸,提高了枝晶干二次 $\gamma'$ 相的数量和面积分数。

研究 [J]. 金属热处理, 1998 (4): 18-20.

- [6] 陈淦生, 仲增墉, 马培立. GH220合金长期时效组织稳定性研究 [J]. 钢铁研究总院学报, 1988 (2): 43-49.
- [7] 汪林, 叶锐曾, 周守礼, 等. GH220合金中晶界针状碳化物的成因 [J]. 北京科技大学学报, 1990 (3): 243-249.
- [8] 倪克铨, 孙金贵, 葛占英, 等. GH220合金的基本组织 [J]. 北京钢铁学院学报, 1986 (S1): 1-12.
- [9] 叶锐曾, 葛占英, 孙金贵, 等. GH220合金中 $\gamma'$ 强化相 [J]. 北京钢铁学院学报, 1986 (S1): 13-22.
- [10] 朱静, 马培立, 贾丽萍, 等. 微量镁对GH220合金蠕变行为的

- 影响 [J]. 钢铁, 1989 (12): 48-54.
- [11] 徐志超, 叶锐曾, 王迪, 等. 热处理和碳对GH220合金组织和性能的影响 [J]. 金属热处理, 1982 (6): 36-43
- [12] 孙金贵, 叶锐曾, 葛占英, 等. W、Mo、Al、Ti对GH220合金微量相影响 [J]. 北京钢铁学院学报, 1986 (S1): 38-44.
- [13] 王中琳, 谢兴飞, 曲敬龙, 等. 稀土在高温合金中的研究进展 [J]. 中国稀土学报, 2026, 44 (3): 263-286.
- [14] RONG L, WANG M, XING W, et al. Effects of cerium addition on the microstructure and stress rupture properties of a new nickel-based cast superalloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 159: 112-124.
- [15] 张思芹, 杨礼林, 李瑞红, 等. Ce元素对铸态Mg-Al-Ca合金显微组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (9): 1436-1440.
- [16] ZHANG H W, QIN X Z, LI X W, et al. Effect of minor additions on the microstructures and stress rupture properties of a directionally solidified Ni-based superalloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 711: 303-312.
- [17] 马腾飞. 稀土元素Nd和Ce对Co-8.8Al-9.8W合金微观组织结构及性能的影响 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [18] 赵大志, 周晨, 廖启宇, 等. Ce、Gd和Nd对Mg-9Li-xRE-0.4Zr-(3Y)合金组织及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2025, 74 (8): 1087-1093
- [19] PAN X L, YU H Y, TU G F, et al. Effect of rare earth metals on solidification behaviour in nickel based superalloy [J]. Materials Science and Technology, 2012, 28 (5): 560-564.
- [20] 刘生. 重型燃气轮机GH4169涡轮盘稀土合金化与构筑成形 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [21] HUFENBACH J, HELTH A, LEE M H, et al. Effect of cerium addition on microstructure and mechanical properties of high-strength Fe85Cr4Mo8V2C1 cast steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 674: 366-374.
- [22] 彭志江, 李志军, 侯介山, 等. 钇、铈对低钎镍基K444返回合金组织与力学性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 2009, 27 (6): 822-828.
- [23] WANG F, MA D, ZHANG J, et al. Effect of solidification parameters on the microstructures of superalloy CMSX-6 formed during the downward directional solidification process [J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 389: 47-54.