



GH4742 合金真空自耗铸锭中夹杂物分布特征

杨曙磊¹, 王曦伟¹, 田强², 王田田¹, 杨树峰¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 钢铁研究总院有限公司, 北京 100081)

摘要:以 $\phi 570$ mm 的合金锭作为自耗重熔的电极, 通过起弧、稳定熔炼和热封顶三个阶段, 制备 $\phi 660$ mm 的真空自耗铸锭, 熔炼过程共历时 860 min。采用场发射电子扫描显微镜和夹杂物自动扫描系统, 分析了真空自耗重熔 GH4742 合金工业铸锭内部及其特征位置(锭冠、搁架、橘皮)处夹杂物的分布规律。结果表明, GH4742 合金真空自耗铸锭中夹杂物的类型主要有 Ti(C, N)、LaAlO₃-Ti(C, N)、Ti(C, N)-(Ti, Nb, Mo)C 及 LaAlO₃-Ti(C, N)-(Ti, Nb, Mo)C 四种。夹杂物的尺寸主要以 $<3 \mu\text{m}$ 的小尺寸夹杂物为主, 从中心到边缘夹杂物的尺寸逐渐降低, 夹杂物的数量密度逐渐增多。铸锭中部中心处夹杂物的尺寸最大, 最大平均尺寸为 $4.14 \mu\text{m}$ 。铸锭底部中心处的夹杂物数量最少, 数量密度为 13.23 个/ mm^2 。铸锭锭冠、橘皮及搁架处分布着聚集的氧化物夹杂, 这是电极上脱落的氧化物在熔池流动作用下运动到铸锭边缘, 被边缘凝固区域捕捉形成的。

关键词: GH4742 合金; 真空自耗重熔; 杂质元素; 夹杂物

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00090 **中图分类号:** TF807

Distribution Characteristics of Inclusions in GH4742 Superalloy Ingot by Vacuum Arc Remelting

Yang Shulei¹, Wang Xiwei¹, Tian Qiang², Wang Tiantian¹, Yang Shufeng¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: A $\phi 570$ mm alloy ingot was utilized as the electrode for vacuum arc remelting, and a $\phi 660$ mm vacuum arc remelting ingot was prepared through the three stages of arc initiation, stabilized melting, and thermal capping. The melting process lasted a total of 860 minutes. The distribution of inclusions in the industrial ingot of vacuum arc remelting GH4742 alloy and its characteristic positions (crown, shelf and skin) was analyzed by field emission scanning electron microscope and inclusion automatic scanning system. The results of the study showed that there were four main types of inclusions in GH4742 alloy vacuum arc remelting ingots, including Ti(C, N), LaAlO₃-Ti(C, N), Ti(C, N)-(Ti, Nb, Mo)C, and LaAlO₃-Ti(C, N)-(Ti, Nb, Mo)C. The size of inclusions was mainly dominated by small-sized inclusions less than $3 \mu\text{m}$. From the center to the edge, the size of inclusions gradually decreased and the number density gradually increased. The largest size of inclusions was observed at the middle center of the ingot, with a maximum average size of $4.14 \mu\text{m}$. The lowest number of inclusions was observed at the bottom center of the ingot with a number density of 13.23 N/ mm^2 . The aggregated oxide inclusions were distributed in the ingot crown, skin and shelf, which were formed when the oxides dislodged from the electrodes move to the edges of the ingot under the action of the flow field of the molten pool and are captured by the solidified regions at the edges.

Key Words: GH4742 Alloy; Vacuum Arc Remelting (VAR); Impurity Element; Inclusion

GH4742 合金由于其优异的热稳定性^[1], 良好的耐高温、抗疲劳性能^[2-3], 被广泛应用于航空航天、燃气涡轮发电、化工工业等领域^[4]。为满足高温、高应力等严苛环境下^[5]的服役要求, GH4742 合金多采用真空感应熔炼+电渣重熔+真空自耗重熔三联冶炼工艺^[6-7]制备。真空自耗重熔作为 GH4742 合金冶炼的最后一步工艺, 其冶金质量对合金产品的性能有着决定性的影响。夹杂物是 GH4742 合金中的典型

缺陷, 在合金服役过程中易成为裂纹的扩展源和扩展通道, 严重降低合金的机械性能。真空自耗铸锭中夹杂物的尺寸、形貌、位置分布等特征将直接遗传到合金部件中, 对合金的强度、延展性以及服役寿命产生较大的影响。研究表明^[8-9], 夹杂物尺寸越大, 数量越多, 越靠近表面, 对合金服役性能的危害越大。因此, 为了全面了解真空自耗重熔 GH4742 合金铸锭中夹杂物的分布特征, 研究通过对工业熔

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3700402)

作者简介: 杨曙磊(1995—), 男, 博士; E-mail: 18231596037@163.com; 收稿日期: 2024-04-14

通信作者: 杨树峰(1981—), 男, 博士, 教授; E-mail: yangshufeng@ustb.edu.cn

炼的自耗铸锭解剖,观察了真空自耗铸锭中夹杂物的形貌特征及尺寸数目分布,明确了自耗重熔铸锭特征位置(锭冠、搁架、橘皮)处夹杂物的分布规律,为真空自耗过程中夹杂物的控制以及后续热加工制度的制定提供了数据支撑。

1 试验材料与方案

采用真空感应熔炼+电渣重熔制备得到 $\phi 570$ mm合金锭,作为真空自耗重熔的电极,电极的成分见表1。真空自耗重熔的熔炼工序包括焊接电极、装炉、抽真空、熔炼、炉冷、脱模等。熔炼过程包括起弧、稳定熔炼和热封顶三个阶段。起弧阶段采用大电流起弧,快速建立熔池,历时100 min。稳定熔炼阶段采用熔滴自动控制,熔炼过程无打弧爬弧现象,历时700 min。当电极重量消耗至设定值后进入热封顶阶段,该阶段需缓慢降低电流、电压和熔速,历时60 min。热封结束后,炉冷4 h后脱模得到 $\phi 660$ mm的自耗铸锭。

为了全面研究GH4742合金真空自耗铸锭中夹杂物的分布特征,分别在真空自耗铸锭的特征位置和铸锭内部取样,并且通过JEOL JSM 7200F型场发射电子扫描显微镜和EVO18-INCAsteel型夹杂物自动扫描系统对样品中的夹杂物进行观测和统计。其中,铸锭特征位置取样包括铸锭顶部的锭冠和搁架以及铸锭表面的橘皮状金属(统称为橘皮),如图1(a)~(c)所示,分别进行冷镶和磨抛,以观测样品

截面处夹杂物的特征。在铸锭的顶部、中部和底部,沿着半径方向在中心、1/2R和边缘处取金相样和用于成分检测的试样。其中,为了避开非稳态成型阶段(起弧阶段和热封顶阶段)对夹杂物观测的影响,取金相样时靠近铸锭内部取样,具体取样位置如图1(d)所示。采用EMGA-830氧氮分析仪检测铸锭不同位置的氧氮含量,试样的取样位置与成分检测的取样位置一致(9个试样),试样尺寸为 $\phi 5$ mm \times 15 mm。铸锭中各位置的主元素成分见表2^[6],自耗铸锭各位置的成分均满足GH4742合金成分要求,在径向和轴向上的元素分布均匀,无宏观偏析。

2 试验结果与讨论

2.1 真空自耗铸锭中杂质元素分布

GH4742合金主要以氮化物夹杂和氧化物夹杂为主,因此,合金中的总氧含量和氮含量对于衡量合金中夹杂物的分布特征尤为重要。铸锭的顶部、中部和底部不同位置处总氧、氮含量如图2所示。由图2可知,合金铸锭中 $w[O]$ 相对较低为0.000 6%~0.001 2%。从径向上看,铸锭边缘处氧含量明显高于铸锭中心处氧含量,这是因为在重熔过程中,电极上掉落的氧化物夹杂会在熔池的流动作用下被冲击到铸锭边缘,并被凝固区域捕捉,进而导致了铸锭边缘总氧含量的升高^[6]。从轴向上看,氧含量在铸锭顶部边缘和底部边缘明显高于中部边缘,没有明显的单调变化趋势。铸锭中的 $w[N]$ 相对较高

表1 GH4742合金电极的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of GH4742 alloy electrode													%
C	Cr	Mo	Ti	Nb	Al	Co	B	Ce	La	O	N	Ni	
0.066	13.84	5.00	2.71	2.56	2.54	9.96	0.006 1	0.000 8	0.002 3	0.000 87	0.002 7	Bal.	

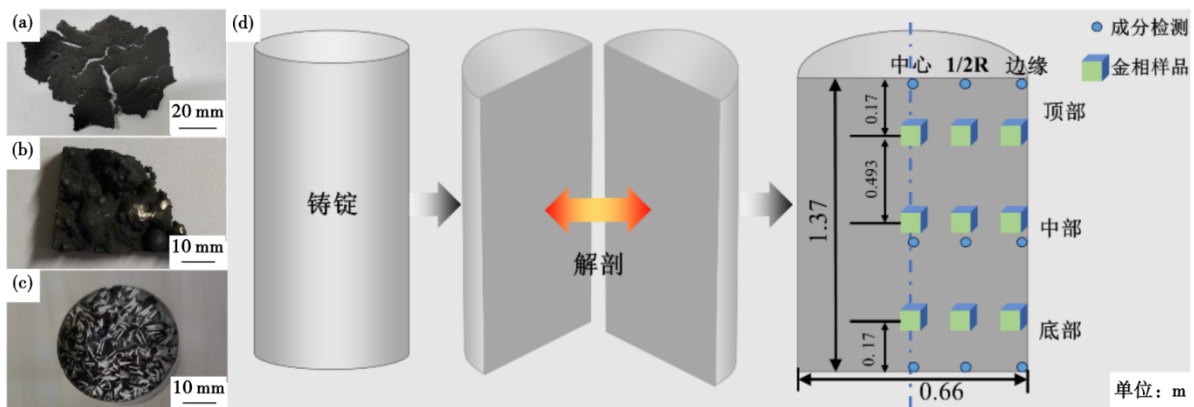


图1 GH4742合金铸锭特征位置及其取样方案:(a)锭冠,(b)搁架,(c)橘皮,(d)取样方案

Fig. 1 The characteristic position and sampling scheme of GH4742 alloy ingot. : (a) crown, (b) shelf, (c) skin, (d) sampling scheme

表2 GH4742合金铸锭中不同位置的主元素成分(质量分数)
Table 2 The main element composition of GH4742 alloy ingot at different positions %

元素	顶部			中部			底部		
	中心	1/2R	边缘	中心	1/2R	边缘	中心	1/2R	边缘
C	0.059	0.056	0.055	0.055	0.054	0.055	0.056	0.056	0.055
Cr	13.79	13.88	13.88	13.9	13.85	13.85	13.88	13.88	13.85
Mo	5.06	5.01	5.05	5.02	5.01	5.01	5.01	5.04	5.04
Ti	2.73	2.65	2.66	2.66	2.64	2.63	2.70	2.72	2.72
Nb	2.74	2.63	2.61	2.60	2.59	2.59	2.61	2.62	2.59
Al	2.71	2.70	2.70	2.67	2.68	2.67	2.62	2.62	2.62
Co	9.75	9.83	9.87	9.86	9.83	9.85	9.79	9.85	9.87
La	0.002 3	0.002 1	0.002 2	0.002 0	0.001 9	0.002 0	0.001 9	0.001 8	0.001 8

注: Ni为余量。

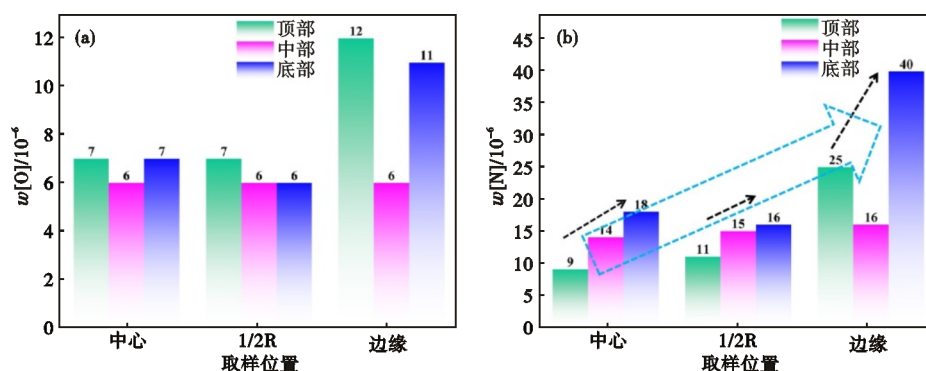


图2 GH4742合金中的杂质元素分布:(a) O, (b) N

Fig. 2 Distribution of impurity elements in GH4742 alloy : (a) O, (b) N

为0.000 9%~0.004%。从径向上看,氮含量从中心到边缘呈明显的增多趋势,这可能是由以下两方面原因造成的:首先熔池在高真空环境下发生脱氮反应^[10],而铸锭从边缘到中心的凝固时间逐渐增长,相应的脱氮时间逐渐缩短,导致边缘处氮含量增加;其次,中心处电弧轰击熔池加快了中心区域氮的传质速率,也进一步加速了熔池脱氮的进程。从径向上看,铸锭底部和顶部边缘处氮含量最高分别为0.004 0%和0.002 5%。铸锭底部边缘处在底部冷却水和边部冷却水共同作用下凝固,凝固速率较快,且起弧阶段真空度较低,脱氮效果较差。铸锭头部边缘处同时受顶部辐射散热和边部冷却水作用,且热封顶阶段顶部热量供应不足,凝固速率较快,氮难以快速脱除。总的来看,从电极到铸锭平均氧含量从0.008 7%降低至0.007 6%,平均氮含量从0.002 7%降低至0.001 8%,真空自耗重熔对氮的脱除能力较强。

2.2 自耗铸锭中夹杂物的分布特征

2.2.1 铸锭中夹杂物的类型和形貌

GH4742合金的合金化程度高且存在大量的亲

氧和亲氮,合金内混入氧、氮等杂质元素,导致夹杂物的成分复杂且类型多样。典型夹杂物的形貌和元素面扫能谱分布如图3、图4、图5所示,夹杂物中不同相的元素组成见表3。可以看出,夹杂物主要以碳氮化物为主,在铸锭中存在不同的元素组成和形态。从成分上分主要有Ti(C,N)、LaAlO₃-Ti(C,N)、Ti(C,N)-(Ti,Nb,Mo)C及LaAlO₃-Ti(C,N)-(Ti,Nb,Mo)C四种类型,从形态上分主要有单层、双层及三层三种结构。

图3为具有单层结构的Ti(C,N)夹杂物,可以看出,该类夹杂物呈多边形,具有尖锐的棱角,与合金基体间存在明显的边界。不同的单层Ti(C,N)夹杂物在电子显微镜下存在衬度差异,这是夹杂物中C原子和N原子所占比例差异造成的,其中N含量占比较低的呈浅灰色,N含量占比较高的呈深灰色。图4为具有双层结构的夹杂物,共存在两种类型。一种是以LaAlO₃为核心,Ti(C,N)在外层包裹,其中,LaAlO₃呈亮白色圆形,尺寸在1~2 μm,Ti(C,N)层呈深灰色多边形,尺寸远大于氧化物核心。另一种是以Ti(C,N)为核心,(Ti,Nb,Mo)C在外层包裹,

其中Ti(C,N)和(Ti,Nb,Mo)C均为多边形,两相存在明显的颜色差异和成分差异,但两相界面存在灰色过渡层,这是在碳化物形成过程中氮贫化产生的。图5为具有三层结构的夹杂物,这类夹杂物包含了单层和双层夹杂物的所有特征,其核心是LaAlO₃夹杂,Ti(C,N)在其表面形成,呈深灰色,当N贫化后逐渐转变为碳化物呈灰白色。

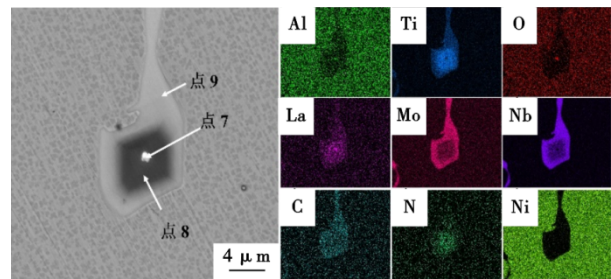


图5 GH4742合金铸锭中具有三层结构的夹杂物
Fig. 5 Inclusion with three-layer structure in GH4742 alloy ingot

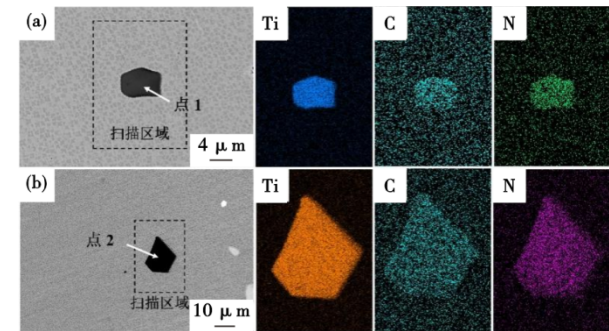


图3 GH4742合金铸锭中具有单层结构的夹杂物:(a)浅灰色的Ti(C,N),(b)深灰色的Ti(C,N)
Fig. 3 Inclusions with single layer structure in GH4742 alloy ingot : (a) light grey Ti(C,N), (b) dark grey Ti(C,N)

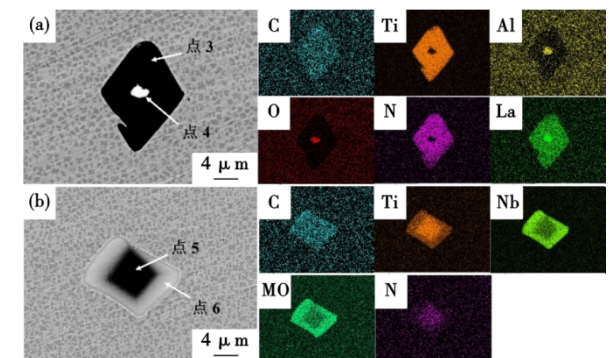


图4 GH4742合金铸锭中具有双层结构的夹杂物:(a) LaAlO₃-Ti(C,N), (b)Ti(C,N)-(Ti,Nb,Mo)C
Fig. 4 Inclusions with two-layer structure in GH4742 alloy ingot : (a) LaAlO₃-Ti(C,N), (b)Ti(C,N)-(Ti,Nb,Mo)C

真空自耗重熔铸锭的锭型较大,中心与边缘熔炼和凝固条件存在显著差异,导致中心和边缘的夹杂物形态存在差异。图6(a)~(c)为铸锭中心样品中非典型夹杂物的形貌。其中,图6(a)和(b)分别为Ti(C,N)-(Ti,Nb,Mo)C和LaAlO₃-Ti(C,N)-(Ti,Nb,Mo)C夹杂物,可以看出,夹杂物外层的碳化物呈长条状和汉字状,其长度在10 μm以上,这是由合金中碳氮化物与凝固过程中偏析形成的碳化物相连接^[11]而形成。图6(c)为LaAlO₃-Ti(C,N)夹杂物,可以看出,核心的氧化物发生开裂且与碳氮化物连接出现孔隙,碳氮化物和基体间存在裂缝。在合金服役过程中,夹杂物不同位置处的裂缝均可能作为合金失效处裂纹的起源,将严重降低合金的机械性能^[12-13]。图6(d)~(f)为铸锭边缘样品中聚集态夹杂物的形貌,可以看出,聚集态夹杂物主要由Ti(C,N)夹杂物组成,呈团簇状或条链状。聚集态的夹杂物长度在14 μm左右,其中每个单体夹杂物尺寸为1~4 μm。相对于单独存在的夹杂物,聚集态的夹杂物尺寸更大,对合金性能的危害也更大。聚集夹杂物在合金受力过程中产生应力集中,并以聚集区域作为裂纹的扩展通道^[14],导致合金部件失效。

表3 GH4742合金铸锭中夹杂物不同相的化学成分(质量分数)

Table 3 Chemical composition of different phases in inclusions in GH4742 alloy ingot

夹杂物及取点位置	C	N	O	La	Al	Ti	Mo	Nb	%
单层夹杂	点1	37.0	20.4	-	-	42.6	-	-	
	点2	25.0	27.4	-	-	47.6	-	-	
双层夹杂	点3	-	-	56.0	22.4	21.6	-	-	
	点4	14.4	33.5	-	-	52.1	-	-	
	点5	36.2	17.8	-	-	46.0	-	-	
	点6	52.6	-	-	-	20.6	2.5	24.3	
三层夹杂	点7	-	-	59.2	23.3	17.5	-	-	
	点8	37.3	21.2	-	-	40.4	-	-	
	点9	58.1	-	-	-	17.6	2.0	22.3	

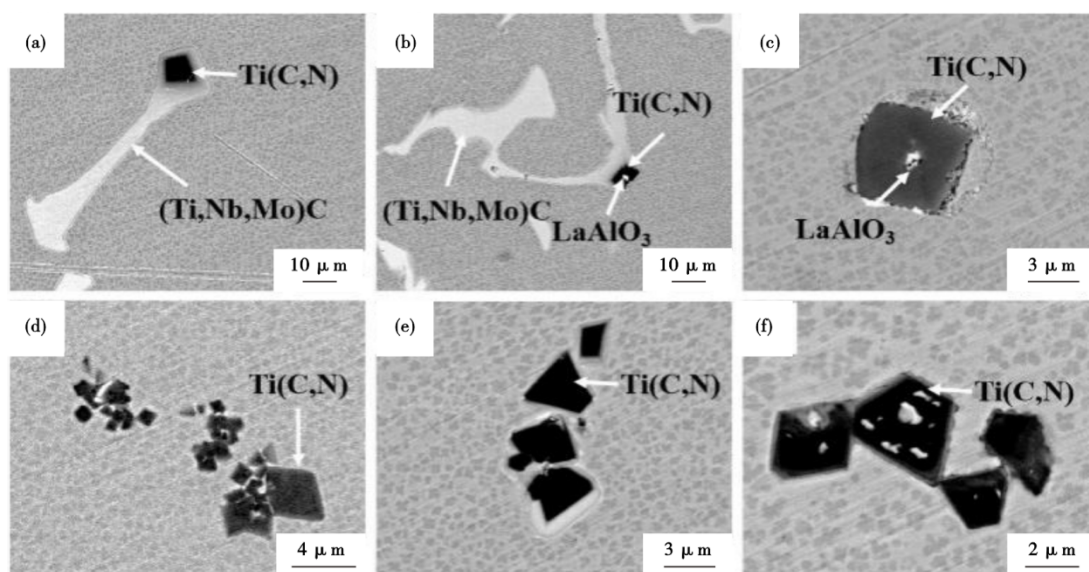


图6 GH4742合金铸锭中非典型夹杂物的形貌特征:(a)~(c)单体异形夹杂物,(d)~(f)聚集类夹杂物

Fig. 6 Morphological characteristics of atypical inclusions in GH4742 alloy ingot : (a)–(c) Individual heterogeneous inclusions, (d)–(f) Cluster of inclusions

2.2.2 铸锭中夹杂物的尺寸和数量分布

为了定量研究夹杂物在真空铸锭内部的分布特征,扫描检测了铸锭中不同位置夹杂物的尺寸和数量分布,其中每个样品的扫描面积 $\geq 25 \text{ mm}^2$,扫描时间 $\geq 40 \text{ min}$ 。将夹杂物的尺寸分为 $< 3 \mu\text{m}$ 、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $> 5 \mu\text{m}$ 三类,统计结果如图7(a)~(c)所示。可以看出,铸锭的顶部、中部和底部不同位置的夹杂物均以 $< 3 \mu\text{m}$ 的小尺寸夹杂物为主,且小尺寸夹杂物从中心到边缘的占比逐渐增多,其中铸锭中部边缘处小尺寸夹杂物占比最高为87.8%,这是真空自耗重熔过程中小尺寸的氧化物夹杂在流场的作用下被排挤到铸锭边缘造成的^[6]。此外,铸锭顶部、中部和底部 $> 5 \mu\text{m}$ 的夹杂物从中心到边缘均呈现逐渐降低的趋势,这是由于相对铸锭边缘,铸锭中心处合金的冷却速率较慢,夹杂物生长的时间较长。

进一步计算不同位置夹杂物的数量密度和平均尺寸,如图7(d)所示。

整体来看,工业铸锭中夹杂物的数量密度较少,且尺寸分布差异较大,这与之前的研究结果一致^[15]。从径向上看,夹杂物的数量密度从中心到边缘逐渐增多,夹杂物的平均尺寸逐渐降低。从轴向上看,夹杂物的数量密度从铸锭底部到顶部逐渐增多,夹杂物的尺寸没有明显的单调特征。其中,铸锭中部的中心处夹杂物的平均尺寸最大,最大平均尺寸为 $4.14 \mu\text{m}$,铸锭底部边缘处夹杂物的平均尺寸最小,最小平均尺寸为 $1.73 \mu\text{m}$,铸锭顶部边缘处的夹杂物数量最多,数量密度为 $39.45 \text{ 个}/\text{mm}^2$,铸锭底部中心处的夹杂物数量最少,数量密度为 $13.23 \text{ 个}/\text{mm}^2$ 。

2.2.3 锭冠、搁架和橘皮处夹杂物的分布特征

锭冠和搁架是真空自耗重熔合金铸锭特有的结构,位于铸锭的顶部边缘,在熔炼过程中随着铸锭的升高而升高。锭冠是铸锭顶部凝结的金属蒸汽和飞溅的金属液滴随着铸锭的生长不断向上移

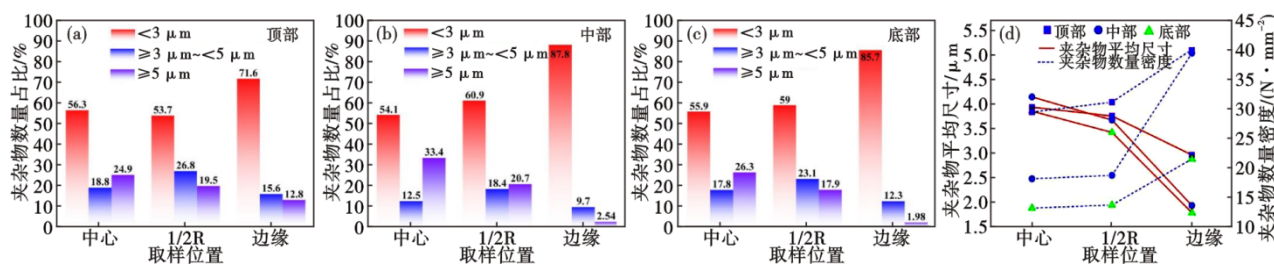


图7 GH4742合金铸锭中夹杂物的尺寸和数量分布:(a)顶部,(b)中部,(c)底部,(d)平均值

Fig. 7 Size and quantity distribution of inclusions in GH4742 alloy ingot : (a) top, (b) middle, (c) bottom, (d) average

动形成的。搁架是由熔池高温熔体向边部冲击,靠近水冷结晶器后快速冷却形成,锭冠的宏观照片如图 1(a)所示。锭冠截面的微观形貌和夹杂物特征,如图 8 和图 9 所示。从图 8 和图 9 中可以看出,锭冠的厚度约为 418.2 μm , 内部存在大量的孔隙。锭冠中的夹杂物主要以 Al_2O_3 为主,且含有少量的 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 。 Al_2O_3 之间发生烧结,且与基体连接不紧密。 Al_2O_3 在锭冠汇聚成条链状和网状,且存在明显的层叠特征。这是由于 Al_2O_3 夹杂不会溶解到合金中,自电极中脱落后漂浮在熔池的上表面,熔池表面的流体在电弧轰击、洛伦兹力及热浮力的共同作用下向结晶器流动,从而造成 Al_2O_3 夹杂物在结晶器壁的锭冠处不断聚集。研究认为,真空自耗重熔中电弧呈周期性转动^[16],进而导致熔池表面产生周期性的流动,使得聚集态或条链状的夹杂物在锭冠上呈现出层叠状或网状结构。Grignard^[17]等在 Inconel 718 合金锭冠处也观察到类似的形貌特征。

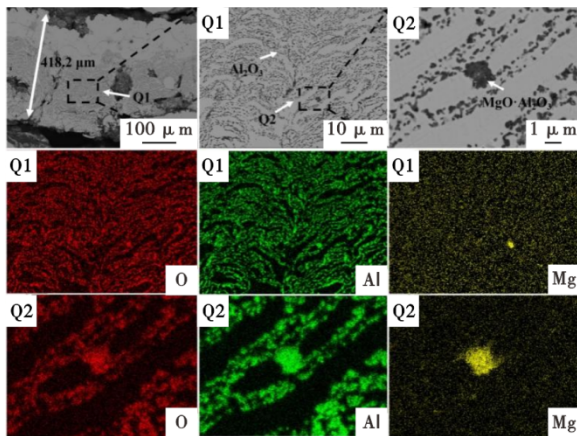


图 8 GH4742 合金铸锭锭冠处条链状夹杂物(Q1、Q2 分别为对应位置局部放大图)
Fig. 8 Chain shaped inclusions at the crown of the GH4742 alloy ingot. (Q1 and Q2 are the local enlarged images of the corresponding positions.)

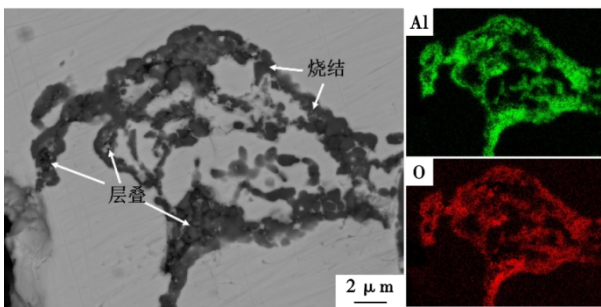


图 9 GH4742 合金铸锭锭冠处的网状夹杂物
Fig. 9 Mesh inclusions at the crown of the GH4742 alloy ingot

搁架位于铸锭头部的上表面突出部分,搁架的宏观照片如图 1(b)。搁架截面处夹杂物的分布如图 10 所示。样品的内部未发现单独或聚集的夹杂物,但搁架的顶部存在一层氧化物层,且有大颗粒的 Al_2O_3 夹杂物浮于上表面。其中,氧化物层可能是铸锭脱模后上表面与外界发生氧化反应而形成,大颗粒 Al_2O_3 是熔炼过程中熔池表面漂浮的 Al_2O_3 夹杂物运动聚集而形成。总的来说,锭冠和搁架中均含有大量聚集态夹杂物,熔炼过程中熔池冲刷使其掉落至熔池中,进而引发脏白斑^[18-19]等冶金缺陷。

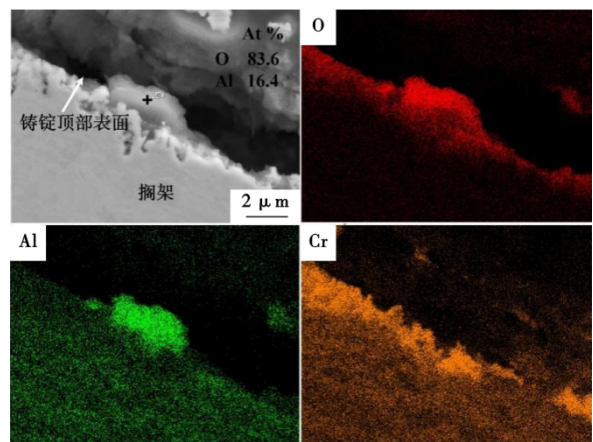


图 10 GH4742 合金铸锭搁架处夹杂物的特征
Fig. 10 Characteristics of inclusions in the shelf of the GH4742 alloy ingot

电弧的轰击和较高的真空度导致高蒸气压元素挥发并在结晶器表面凝结,在铸锭表面形成金属冷凝层,随着铸锭逐渐升高,部分冷凝层上涨形成锭冠,其余部分黏连在铸锭表面形成橘皮。橘皮样品如图 1(c)所示,橘皮截面的夹杂物特征,如图 11 所示。从图 11 中可以看出,橘皮处存在与锭冠上相同的条链状聚集态 Al_2O_3 夹杂物。因此,真空自耗铸锭制备完成后应对铸锭的表面进行车削,从而去除铸锭表皮聚集的氧化物夹杂。

3 结论

(1)铸锭中氮含量从铸锭中心到边缘呈明显的增长趋势,从径向上看,铸锭底部边缘和铸锭顶部边缘氮含量最多,分别为 0.004%、0.002 5%,这是铸锭边部冷却速度快,脱氮时间较短造成的。从电极到铸锭平均氧含量从 0.008 7%降低至 0.007 6%,平均氮含量从 0.002 7%降低至 0.001 8%。

(2)GH4742 合金真空自耗铸锭中主要存在单层 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 夹杂,双层 $\text{LaAlO}_3\text{-Ti}(\text{C}, \text{N})$ 、 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ -

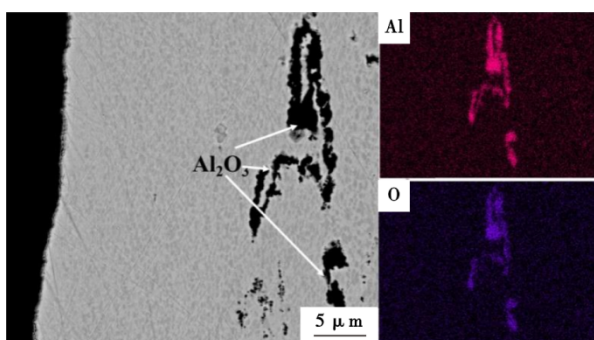


图11 GH4742合金铸锭橘皮处夹杂物的特征

Fig. 11 Characteristics of inclusions in the skin of the GH4742 alloy ingot

(Ti, Nb, Mo)C夹杂以及三层 $\text{LaAlO}_3\text{-Ti(C, N)-Ti}$,

参考文献

- [1] 张丰之. GH4742大型涡轮盘材料热稳定性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [2] Zhang W W, Liu X G, Du Q, et al. Microstructure evolution in GH4742 superalloy by combining hot deformation and heat treatment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 13-35.
- [3] Qin H Y, Tian Q, Zhang W W, et al. Microstructure Evolution of GH4742 Ni-Based Superalloy during Hot Forming[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(7): 5652-5667.
- [4] 杜金辉, 赵光普, 邓群, 等. 中国变形高温合金研制进展[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 27-39.
- [5] Liang Z, Lei W, Yang L, 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 杨金龙, 朱晓闽, 熊江英, 等. 夹杂物尺寸及分布对FGH97高温合金低周疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(5): 1614-1622.
- [9] 惠卫军, 董瀚, 陈思联. 非金属夹杂物和表面状态对高强度弹簧钢疲劳性能的影响[J]. 特殊钢, 1998, (6): 8-14.
- [10] 罗小雨, 郭靖, 郭汉杰, 等. IN718镍基高温合金熔体脱氮和TiN析出热力学研究[J]. 特殊钢, 2024, 45(1): 33-41.
- [11] Zhang J, Li J, Shi C Bet al. Growth and agglomeration behaviors of eutectic M7C3 carbide in electrosag remelted martensitic stainless steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 1490-1505.
- [12] Yang S F, Yang S L, Qu J L, et al. Inclusions in wrought superalloys: a review[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(8): 921-937.
- [13] Liu P F, Jiang H, Dong J X, et al. Effect of micron-scale nonmetallic inclusions on fatigue crack nucleation in a nickel-based superalloy[J]. International Journal of Solids and Structures, 2023, 279: 112368.
- [14] Texier D, Stinville J C, Echlin M P, et al. Short crack propagation from cracked non-metallic inclusions in a Ni-based polycrystalline superalloy[J]. Acta Materialia, 2019, 165: 241-258.
- [15] 田强, 杨曙磊, 秦鹤勇, 等. 大尺寸GH4742合金铸锭夹杂物及析出相分布特征[J]. 中国冶金, 2022, 32(2): 52-59.
- [16] Chapelle P, Bellot J P, Jardy A, et al. An experimental study of the electric arc during vacuum arc remelting[J]. High Temperature Material Processes, 2000, 4(4): 493-506.
- [17] 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.
- [18] 谭海兵, 黄烁, 王静, 等. 白斑缺陷GH458合金组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2020, 56(10): 1411-1422.
- [19] Zhang W, LEE D P, Mclean M. Numerical simulation of dendrite white spot formation during vacuum arc remelting of INCONEL718[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(2): 443-454.