

镍基高温弹性NiCrWCo合金夹杂物特征与形成机理研究

朱 斌¹ 胡 瑜¹ 栗克建² 陈知伟¹ 于硕硕²

(1 宝武特冶航研科技有限公司, 重庆 400084)

(2 重庆科技大学冶金与动力工程学院, 重庆 401331)

摘 要 镍基弹性合金具有优良的耐腐蚀性和高温力学性能,合金中的夹杂物缺陷严重影响丝材制备过程的成材率。通过扫描电镜和能谱分析方法,对NiCrWCo合金中夹杂物进行了研究,并对夹杂物来源、类型和形成机理进行了分析。研究表明:在NiCrWCo合金中存在颗粒状或链状的 Al_2O_3 、TiCN、TiC、WC、 Cr_2O_3 和 Al_2O_3 等夹杂物,颗粒状尺寸 $1.5\sim 3.5\ \mu\text{m}$,链状长度为 $3\sim 15\ \mu\text{m}$,夹杂物的成因主要是冶金原料纯度低、熔炼过程气体保护不充分,以及冷却过程存在凝固偏析等,最后对夹杂物控制方案从冶炼原料、炉衬污染、冶炼真空控制等方面进行了探讨。

关键词 高温合金, NiCrWCo, 缺陷, 夹杂物

中图分类号: TF743

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2025.03.009

Study on Inclusion Characteristics and Formation Mechanism of Nickel-based High Temperature Elastic NiCrWCo Alloy

ZHU Bin¹ HU Yu¹ LI Kejian² CHEN Zhiwei¹ YU Shuoshuo²

(1 Baowu Metallurgy Aviation Research Technology Co., Ltd., Chongqing 400084)

(2 School of Metallurgy and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331)

Abstract Nickel-based elastic alloy had excellent corrosion resistance and high temperature mechanical properties. The inclusion defects in the alloy seriously affect the yield of wire in the preparation process. The inclusions in NiCrWCo alloy were studied by scanning electron microscopy and energy spectrum analysis, and the sources, types and formation mechanism of inclusions were analyzed. The results show that there are granular or chain-like Al_2O_3 , TiCN, TiC, WC, Cr_2O_3 , Al_2O_3 and other inclusions in the NiCrWCo alloy. The particle size is $1.5\sim 3.5\ \mu\text{m}$, and the chain length is $3\sim 15\ \mu\text{m}$. The causes of inclusions are mainly due to the low purity of metallurgical raw materials, insufficient gas protection in smelting process and solidification segregation in cooling process. Finally, the inclusion control scheme is discussed from the perspectives of raw materials for smelting, furnace lining contamination, and vacuum control during smelting.

Key words Superalloy, NiCrWCo, Defect, Inclusion

0 引言

镍基高温弹性合金具有良好的耐腐蚀性和高温力学性能以及突出的高温抗氧化性特性,因此广泛应用于航空航天、能源和国防工业等领域^[1-4]。NiCrWCo高温弹性合金苏联1969年研制的Эп578,属Ni-Cr-W-Co系沉淀硬化型合金,含有较多的时效强化元素Al、Ti,且两者质量分数比之和大于4.5%,并含有固溶强化元素Cr、W、Co等,通常采用真空感应炉熔炼,并经真空自

耗炉或电渣炉重熔,后续热加工则采用锻造、轧制等工艺。该合金在550℃以下具有较高的弹性、机械性能,适用于制作飞机发动机油门弹簧^[5-6]。在该类合金中夹杂物主要以复合氧化物为主,还有陶瓷类夹杂物^[7],Al、Ti的氧化物^[8],以及冶金过程与外界环境反应生成的氧、硫、氮化合物^[9-10]。夹杂物导致材料的显微结构不均匀,在外界载荷条件下,导致裂纹源的形成和快速扩展^[11]。同时,由于NiCrWCo合金中W含量在10%左

收稿日期:2022-02-27;修回日期2023-01-10

第一作者简介:朱斌,1969年出生,正高级工程师,主要从事高温合金开发和应用的研发工作。E-mail: zhubincq@foxmail.com

通信作者:栗克建,1988年出生,高级工程师,主要从事特种合金材料与显微表征的研发工作。E-mail: likejiann@cqust.edu.cn

右,极易产生成分偏析,影响合金的组织 and 性能,使合金热加工塑性区变窄,塑性变差;合金中添加了较多时效强化元素 Al、Ti,虽起到了强化作用,但是 Al、Ti 与 O、N 反应易形成脆性夹杂和不变形夹杂,也会导致合金热加工性能受损;另外,冶炼原材料中原有的脆性夹杂和不变形夹杂,同样也会影响加冷、热加工性能^[12-13]。

通过对 NiCrWCo 合金成品丝材中的夹杂物进行了定性、定量研究,对其化学成分、物相组成、形状、大小、数量和分布进行了统计,并对其来源、形成过程以及加工过程中的变化进行分析,该研究结果可

为后续的工艺优化提供借鉴。

1 实验

1.1 原材料

原材料通过真空感应熔炼炉(VIM)与电渣重熔(ESR)双联冶炼工艺制备^[14],分析试样取自 $\Phi 0.8$ mm 的 NiCrWCo 合金成品丝材。生产工艺流程为真空熔炼→电渣重熔→均匀化扩散处理→锻造开坯→轧制→固溶→酸洗、涂层润滑→拉丝→检测→包装、入库。检验试样化学成分如表 1 所示。

表 1 NiCrWCo 的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of NiCrWCo													%(质量分数)
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Al	Co	W	Nb	Fe	Cu	Ni
0.024	0.036	0.010	0.004 0	0.001	19.23	3.17	1.45	6.04	9.36	0.006	0.14	0.010	余量

1.2 试样制备

1.2.1 扫描电镜、能谱分析试样制备

采用金相热镶嵌完成试样纵向剖面 and 横截面制样,使用 2000#砂纸打磨后,进行抛光处理。

1.2.2 缠绕试验试样制备

对不同支(盘)丝材上任取 2 个试样^[14],分别记为 a、b;芯棒直径为 2.2 mm,在芯棒缠绕 8 圈丝材,将缠绕后的丝材试样进行表面清洁干燥。

1.3 性能表征

(1)通过扫描电镜(SEM)对缠绕试样在应力条件下的宏观形貌进行表征,并对试样夹杂物的形貌、尺寸 and 分布进行表征。

(2)通过能谱(EDS)对试样中夹杂缺陷处的化学

成分进行表征。

(3)直线丝材上任取 2 个试样,在万能拉伸机上完成力学性能测试。

2 结果分析

2.1 镍基高温弹性 NiCrWCo 合金夹杂物分析

镍基高温弹性 NiCrWCo 合金缺陷处 SEM 图像如图 1 所示。图 1(a)为大颗粒夹杂缺陷,通过放大可以观察到,在夹杂物末端周围存在微裂纹,如图 1(b)所示;图 1(c)可以看出样品表面存在气孔 and 链状夹杂;图 1(d)中存在阴影的夹杂物区域,由内而外颜色逐渐变淡,在夹杂物的区域周围存在裂纹;图 1(e)可以看出在夹杂物周围存在细小裂纹;图 1(f)可以看出部分夹杂物呈现链状。

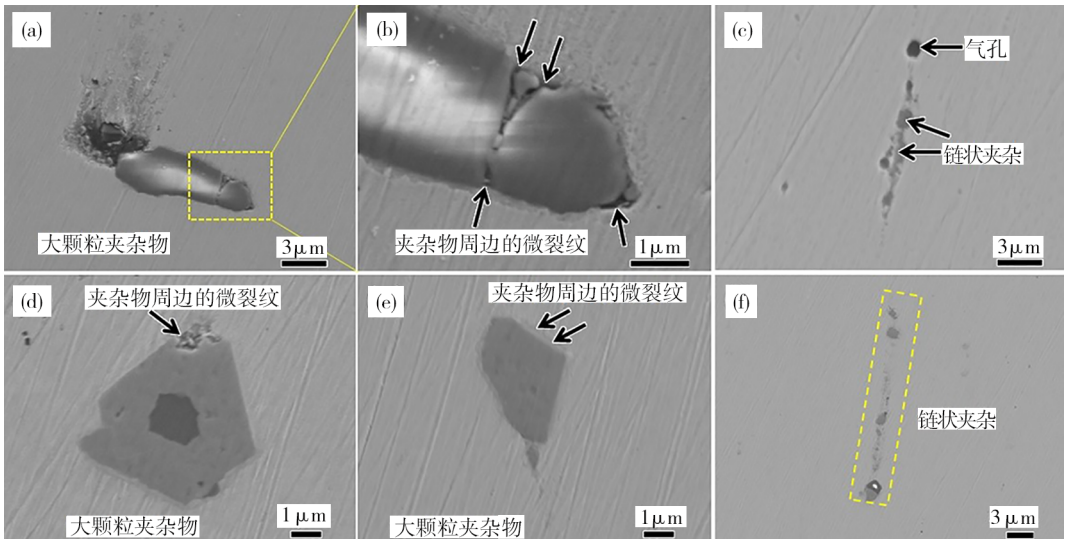


图 1 镍基高温弹性 NiCrWCo 合金 SEM 图像

Fig. 1 SEM images of nickel-based high temperature elastic NiCrWCo alloy

镍基高温弹性 NiCrWCo 合金中大颗粒夹杂 EDS 面扫描图像如图 2 所示。图 2(a)为原始样品夹杂缺陷处 SEM 图像;图 2(b)–图 2(i)分别为 Al、O、W、Cr、

Ni、C、Ti 和 Co 的化学成分检测。从结果来看,夹杂物缺陷区域出现 Al 和 O 的富集,由此可推断出该夹杂物为 Al₂O₃ 颗粒夹杂。

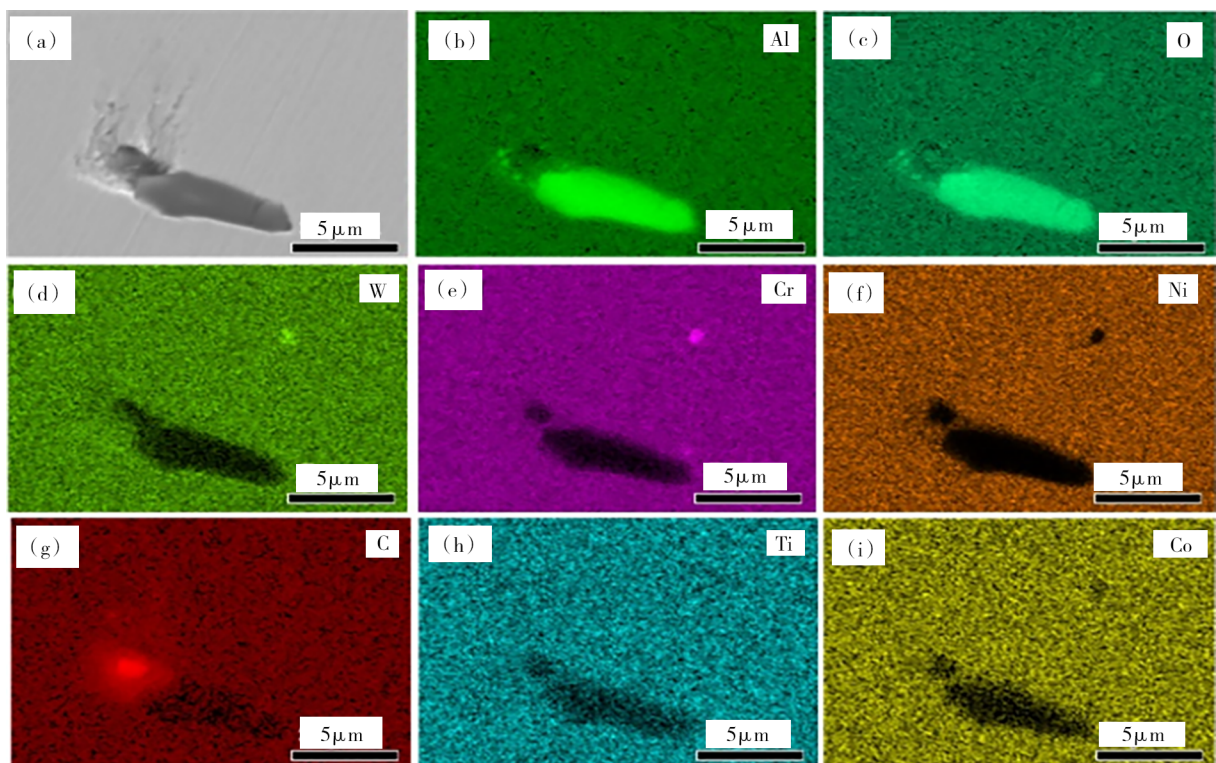


图2 颗粒夹杂物EDS面扫描

Fig. 2 EDS area scanning of large particle inclusions

镍基高温弹性NiCrWCo合金团状包裹夹杂EDS面扫描图像如图3所示。图3(a)为原始样品夹杂缺陷处SEM图像；图3(b)–图3(i)分别为N、Ti、C、Al、W、O、Co、和Ni的化学成分检测。对比位置可知在图3(a)阴影中心深色阴影区域富集O和Al；在深色阴

影周边环状区域是N和Ti的富集，在环状区域的边界出现是C和W的富集。因此，该团状夹杂缺陷是以 Al_2O_3 为中心，由内而外依次为TiN、TiN–TiNC–WC共存以及WC呈分层包裹存在。

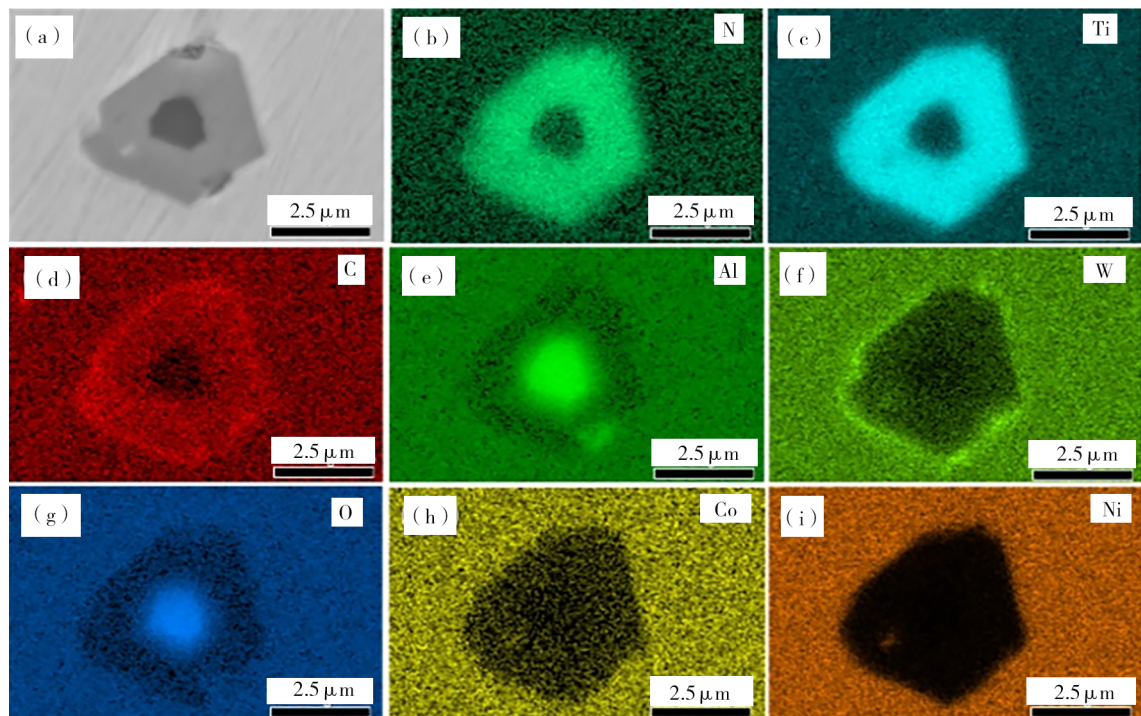


图3 团状夹杂物EDS面扫描

Fig. 3 EDS area scanning of clustered inclusions

镍基高温弹性NiCrWCo合金链状夹杂EDS面扫描图像如图4所示。可以看出,夹链状杂物缺陷区域出现了N、C、Ti、Cr、Ni、O、W和Al元素的富集,因此,该类型夹杂物可推断为TiCN、Cr₂O₃、Al₂O₃和WC等多种化合物混合的夹杂。

通过以上图谱可知,样品基体表面的Ti、C和N元素富集现象明显。为了验证TiCN主要存在形式,在样品基体上完成EDS选区的化学成分分析,结果如图5所示。

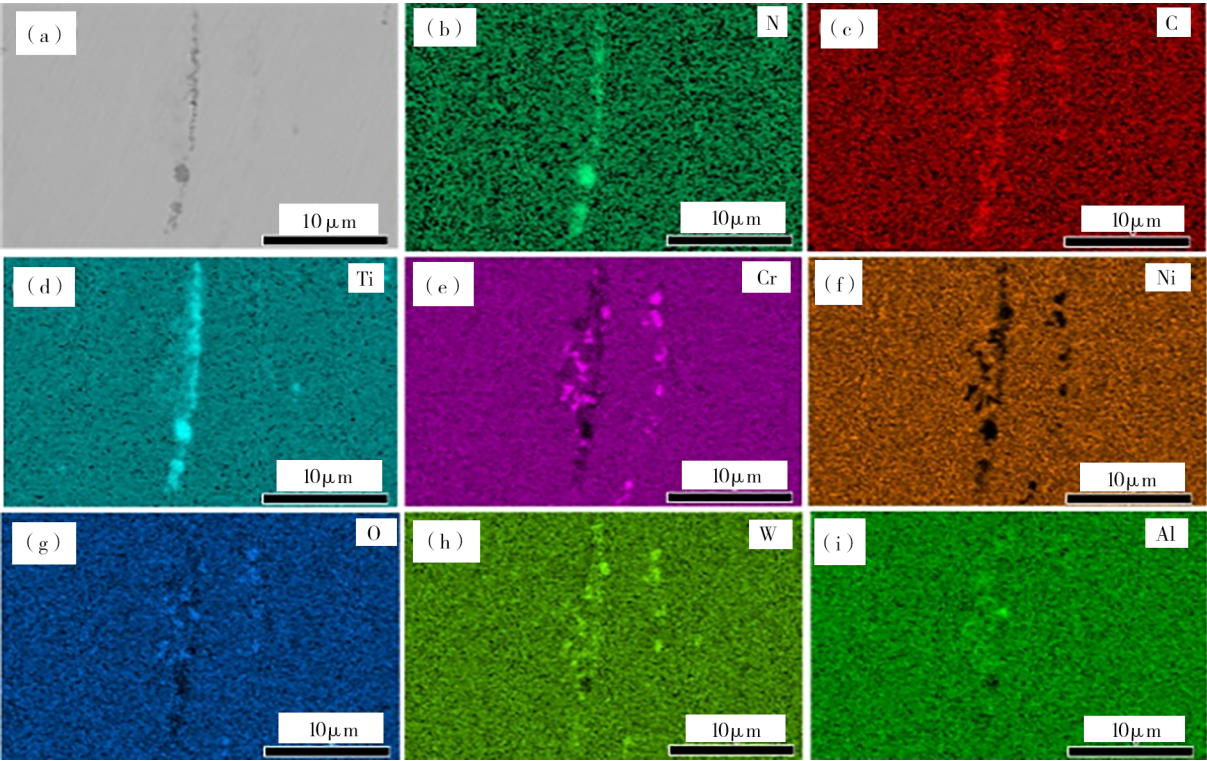


图4 链状夹杂物EDS面扫描
Fig. 4 EDS area scanning of chain inclusions

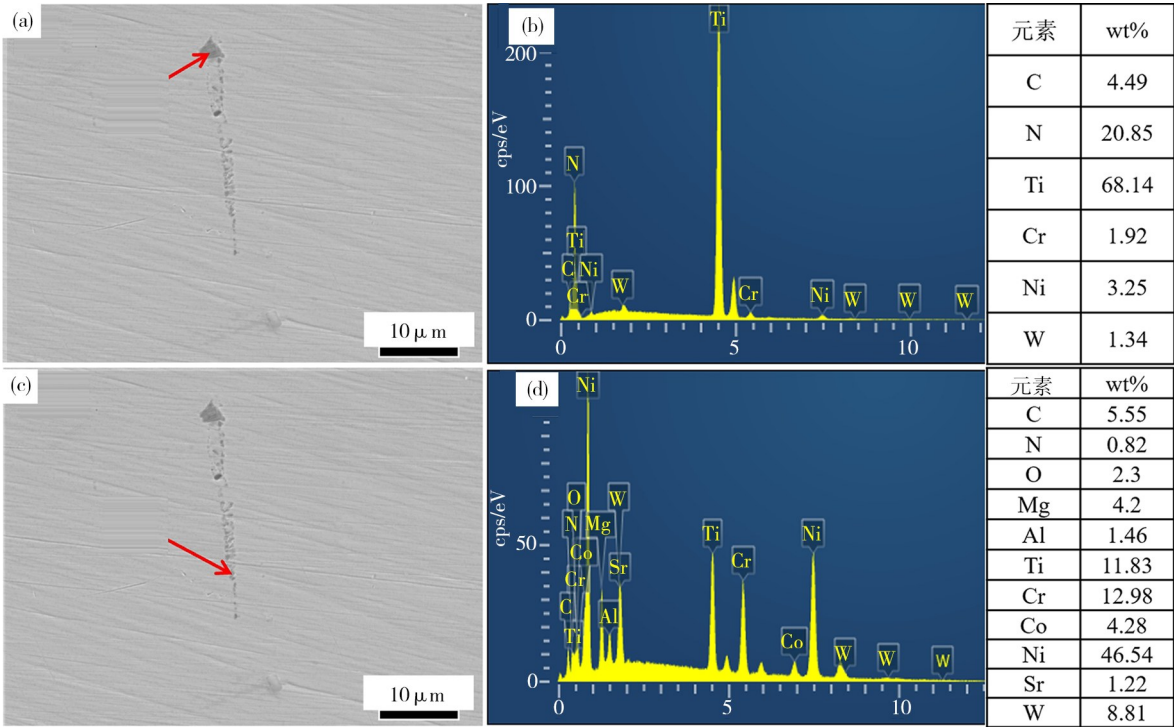


图5 EDS测定链状夹杂物
Fig. 5 EDS determination of chain-like inclusions

镍基高温弹性NiCrWCo合金基体表面特殊夹杂物如图6所示。图6(a)样品基体表面存在三种不同形貌的夹杂缺陷,在EDS测试以上缺陷处化学成分后,分析可知图6(b)为TiCN,图6(c)为气孔,图6(d)为Al₂O₃-TiC,测量得TiCN尺寸约为3.5 μm,Al₂O₃-TiC尺寸约为

2.8 μm。

在基体表面选区内部的夹杂物形貌不同,形状不同的块状和长度不同的链状夹杂数量较多,如图7所示。通过成分测试可知,以上夹杂物均为TiCN,大部分链长3~15 μm,只有两条长45~48 μm。

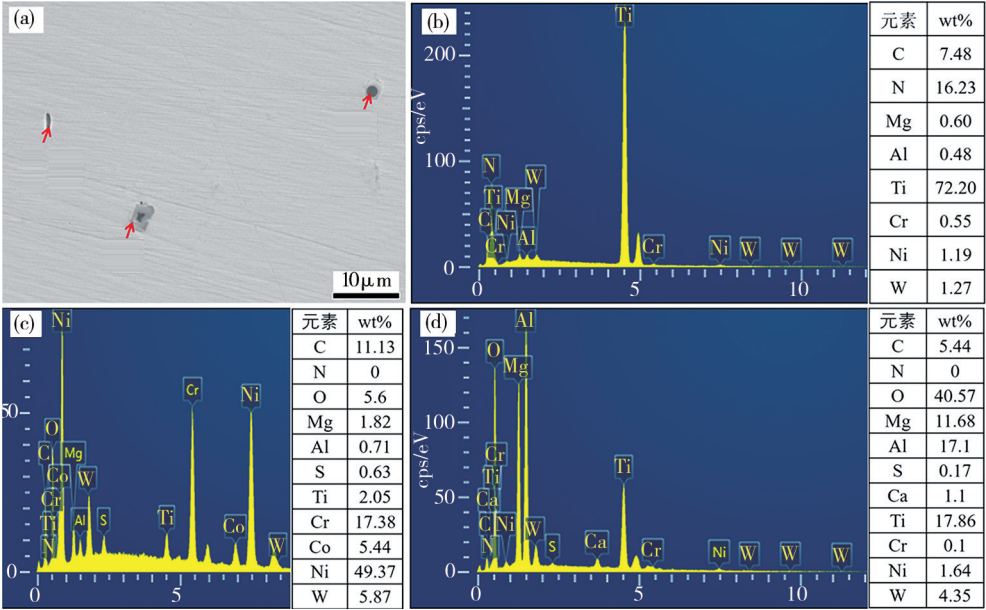


图6 特殊夹杂物EDS图谱
Fig. 6 EDS profiles of special inclusions

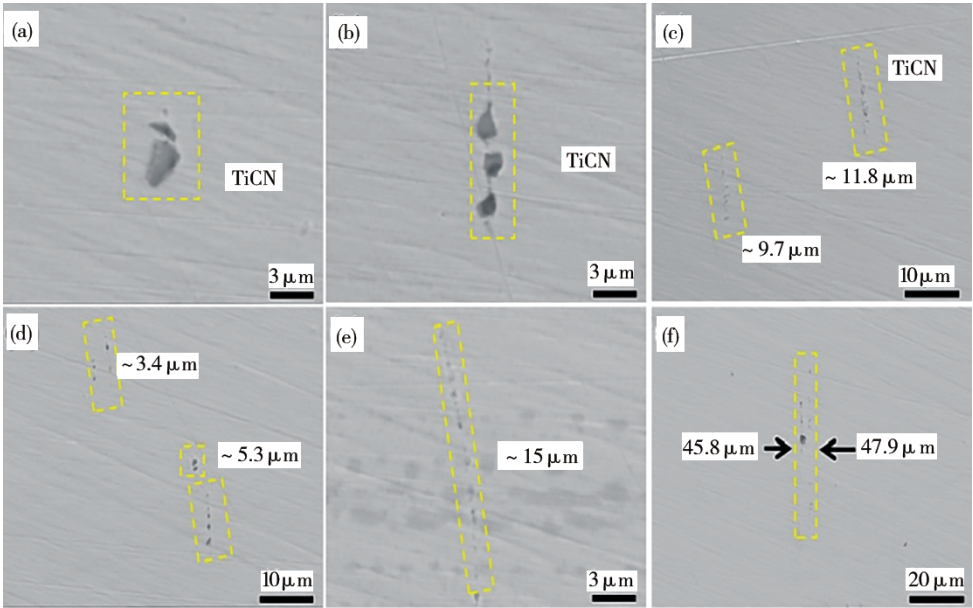


图7 SEM分析TiCN的尺寸及存在形式
Fig. 7 SEM analysis of the size and existence form of TiCN

2.2 镍基高温弹性NiCrWCo合金夹杂等级评价

依据 GB/T10561—2005/ISO4967: 1998 (E) 对NiCrWCo合金中的夹杂物进行评级。第一种方法为检验整个抛光面,对于每一类夹杂物,按细系和粗系记下与所检验面上最恶劣视场相符合的标准图片的级别数;第二种方法为确定视场总数,并通过公式计

算所述级别数量,确定等级。按照第一种方法对夹杂物进行评级,样品中的夹杂属于B类链状夹杂,最小总长度为45 μm,宽度<0.5 μm,评定结果为细系0.5级;按照第二种方法对夹杂进行评级,样品中夹杂分为B类和D类,其中只有B类细系>0.5级,为0.57,其他<0.5级。

2.3 镍基高温弹性 NiCrWCo 合金缠绕试验后的形貌

缠绕后的镍基高温弹性 NiCrWCo 合金 SEM 图像如图 8 所示。图 8(a)、图(e)分别是长度为 10 mm 的试样缠绕图像,宏观图像中两个试样表面并未发现

明显裂纹;图 8(b)–图 8(d)和图 8(f)–图 8(h)是两个试样在不同放大倍数下的 SEM 图像,从图中可以明显观察到,随着放大倍数的增加,两个试样表面的裂纹愈加明显,具有分布范围广、密度高和裂纹长度相异等特点。

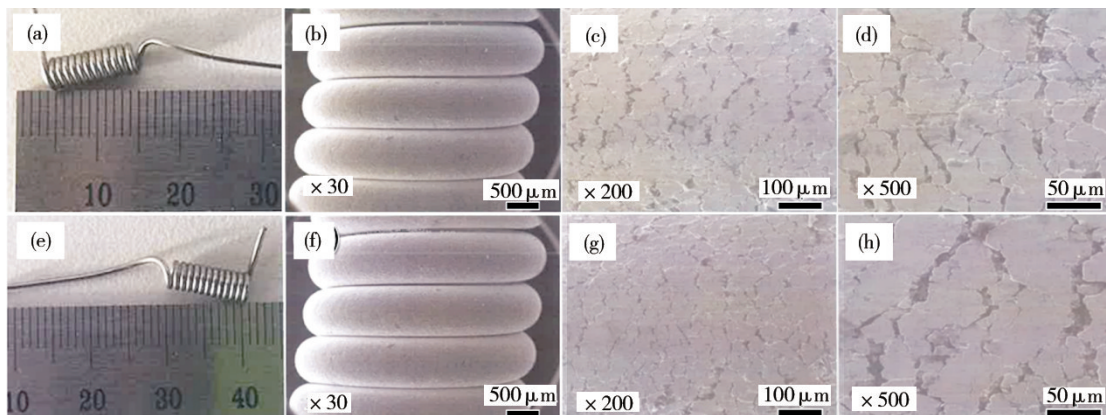


图 8 缠绕型 NiCrWCo 试样 SEM 图像

Fig. 8 SEM images of wound type NiCrWCo samples

2.4 镍基高温弹性 NiCrWCo 合金延伸率

通过在室温下对未缠绕的两根丝材样品进行拉伸试验,两次实验的抗拉强度均超过 1 800 MPa,延伸率分别为 2.2% 和 2.4%。

3 讨论

3.1 NiCrWCo 合金中夹杂物的来源

NiCrWCo 合金的合金元素中 Al 和 Ti 等强化元素含量较高,极易被氧化^[15–16]。夹杂物来源主要有冶金原料中的尖晶石、Al₂O₃ 等不同类型的氧化物夹杂。

真空冶炼原材料中,不可避免含某些金属氧化物。例如,若炉料中掺杂一些返回料,则会带入 TiO₂ 和 Al₂O₃ 等夹杂物;此外钢中的氮和氧化物夹杂,主要是由原料带入,当钢中含有 Ti、V 等合金元素时,它们与 N 生成氮化物夹杂,在真空冶炼时不易分解去除^[17]。

在冶炼过程,材料中的 N 和 O 含量由于空气溶解到熔体中而逐渐增加^[18]。合金中的 Al 元素极易被氧化,且优先于 Mn 和 Cr 等合金元素,在后期夹杂物的产生过程中,Al₂O₃ 夹杂出现的时间也优先其他夹杂物^[19]。

夹杂物中 O、N 主要来源于原材料中的氧化物和氮化物;熔炼过程中,真空高温使得 CaO 坩埚等耐火材料热稳定性降低,造成熔体增氧而产生夹杂^[20];ESR 电渣熔炼中的渣料可参与到物料中氧化物的反应中,导致夹杂物的产生^[21]。熔炼过程中,随着冷却时间的延长,温度逐渐降低,Ti 逐渐与 N 结合形成 TiN 析出,在出钢过程中,陶瓷过滤网对氮化物过滤效果不明显,导致材料中产生氮化物夹杂^[22–23]。丝

材在生产过程受拉伸的影响,TiN 型夹杂物因其较差的变形性而破裂,呈现出链状分布^[24]。

3.2 NiCrWCo 合金中夹杂物的形成过程

较高含量 Ti 元素的加入促进了强化相量增加^[25],NiCrWCo 合金的合金化程度高,冶炼过程中少量 Al 和 Ti 易和液体中的 N 和 O 元素发生反应生成 Al₂O₃ 和 TiN 等夹杂物^[26];结晶过程中易出现凝固偏析现象。凝固偏析是合金凝固过程中由于溶质元素的溶解度差异造成的微观组织化学成分变化^[27–28]。在冷却凝固过程中,温度未降低至 1 400 °C 时 Al₂O₃ 析出已经达到最大值;当温度低于 1 400 °C 时,Ti 和 N 富集现象明显;随着冷却时间延长,得到了以 Al₂O₃ 作为异质形核质点析出 TiN 夹杂物;碳化物的相变温度在 760~982 °C,当温度低于 760 °C 时,液相碳化物逐渐凝固析出,最终得到以 Al₂O₃ 为作为异质形核点、TiN 和 WC 双层包裹状夹杂物^[29–31]。

LIANG 等^[32]研究发现,在实验熔炼初期取样时,夹杂物中主要有 Al₂O₃ 而未发现含 Ti 夹杂物的出现;在熔炼后期取样时,夹杂物中含 Ti 量增加,TiN 夹杂逐渐在原始夹杂物周围出现聚集现象。此外,当合金中局部 Ti 浓度过高,使得 Ti 和 N 浓度过饱和度达到异质形核的条件而形成以 Al₂O₃ 为中心 TiN 外层包裹的复合夹杂^[33]。

高温合金铸锭在冷却过程中,由于结构内外散热条件差异显著,冷却速度不同,会产生溶质偏析和碳化物析出^[34]。在镍基合金中,能够与 Ni 近似形成间隙固溶体的元素,如 W、C、S 等则偏析程度大^[6],NiCrWCo 合金中 W 和 C 元素含量较高,冷却过程中

极易出现WC等严重偏析现象。

3.3 NiCrWCo合金中夹杂物在冷热加工过程中的变化

NiCrWCo合金基体表面出现的大量氧化物和碳化物夹杂,且夹杂物周边存在裂纹。随时间延长,应力条件下碳化物在晶体内部会发生断分解,得到细化后的碳化物,裂纹阻力增加,断裂方式从沿晶断裂逐渐变成穿晶破裂^[35-36]。同时,Al₂O₃、TiCN夹杂作为裂纹源,在受到外加应力时,导致材料开裂^[37]。

3.4 NiCrWCo合金在缠绕试验中微观组织和延伸率变化

将丝状NiCrWCo合金进行缠绕时,在低倍扫描电镜下可以观察到由于试验外表面受到拉应力影响,材料表面出现不同的裂纹,在高倍扫描电镜下,裂纹现象更加严重,分布更加密集。室温下拉伸试验得到的延伸率均低于5%,可视为脆性材料^[38];由于材料内部存在富O环境,裂纹呈现出氧化形貌^[39-40]。脆性材料表面分布大量的氧化型裂纹,在材料反复运动中,逐渐变为裂纹源,在应力条件下逐渐扩展,最终会导致材料发生断裂^[41-42]。

总之,夹杂物应从冶炼原料、炉衬污染、冶炼真空等方面控制。(1)采用高纯度原料,选用5~7N高纯度的金属Ni、Cr、W、Ti、Al等,最大幅度降低氧化物、氮化物及杂质元素至ppm级。(2)采用铝镁质坩埚,铝镁质耐火材料炉衬在真空下稳定性好,优于镁质、钙质坩埚,可以减小合金熔体与坩埚反应程度,有利于降低合金熔体中的[O]含量和内生氧化物夹杂数量。(3)采用陶瓷过滤器,可以通过阻挡、沉淀、吸附作用实现合金液体的净化,提高合金锭的纯洁度。(4)采用VIM+VAR双联工艺,在高真空条件下,没有空气、炉渣的污染,冶炼的合金纯净;低熔点杂质元素可蒸发去除一部分,使合金提纯;高真空下脱气,降低气体含量;不稳定非金属夹杂物在高真空、高温电弧作用下分解去除,稳定的非金属夹杂物则破碎、细化或上浮熔池表面去除,或被电弧排斥到熔池边缘去除,提高合金纯净度。

4 结论

(1)NiCrWCo合金发现的夹杂物有:TiCN、Al₂O₃、WC、Cr₂O₃、Al₂O₃-TiC包裹,主要形态有颗粒状和链状,颗粒状尺寸1.5~3.5 μm,链状主要尺寸长为3~15 μm,少量气孔和其他类夹杂2.5~3.5 μm,依据GB/T10561—2005/ISO4967:1998(E)对NiCrWCo合金中的夹杂物进行评级,A法细系为0.5级,B法为0.57级。

(2)夹杂物主要来源:冶金原料中的尖晶石和刚玉、精炼过程产生的夹杂、氧化阶段氧化反应不充分宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第3期

导致氮化物的产生等。

(3)夹杂物形成和演变:冶炼过程Al和Ti易和氮氧元素发生反应生成Al₂O₃和TiN等夹杂物,冷却过程中,由于存在凝固偏析现象,导致TiN、WC以Al₂O₃为形核点析出,形成包裹状TiCN的复相夹杂。

(4)裂纹形成和演变:缠绕过程中材料外表面受到应力产生裂纹,在材料反复运动中逐渐变成裂纹源并进行扩展,最终导致材料开裂。

参考文献

- [1] CHEN M S, ZOU Z H, LIN Y C, et al. Effects of annealing parameters on microstructural evolution of a typical nickel-based superalloy during annealing treatment [J]. Materials Characterization, 2018(141):212-222.
- [2] 王林珠,李翔,刘录凯,等. 镍基高温合金中非金属夹杂物成分和特征控制[J]. 中国冶金, 2021, 31(5):32-38, 71.
- [3] WANG L Z, LI X, LIU L K, et al. Control on composition and characteristic of non-metallic inclusions in nickel-base superalloy[J]. China Metallurgy, 2021, 31(5):32-38.
- [4] LI S L, QI H Y, YANG X G. Oxidation-induced damage of an uncoated and coated nickel-based superalloy under simulated gas environment [J]. Rare Metals, 2017, 37(3):204-209.
- [5] HE D G, LIN Y C, TANG Y, et al. Influences of solution cooling on microstructures, mechanical properties and hot corrosion resistance of a nickel-based superalloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019(746):372-383.
- [6] 唐中杰,郭铁明,付迎,等. 镍基高温合金的研究现状与发展前景[J]. 金属世界, 2014(1):36-40.
- [7] TANG Z J, GUO T M, FU Y, et al. Research present situation and the development prospect of nickel-based superalloy [J]. Metal World, 2014(1):36-40.
- [8] 于敏,傅祖明,蔡凯洪,等. 高温高弹性3J68合金均匀化退火工艺研究[J]. 金属材料研究, 2013, 39(4):5-9.
- [9] YU M, FU Z M, CAI K H, et al. Research on homogenization annealing process of high-temperature and high-elasticity 3J68 alloy[J]. Journal of Metal Materials Research, 2013, 39(4):5-9.
- [10] 许婷婷. 高温合金K465和DZ40M纯净化工艺及机理研究[D]. 沈阳理工大学, 2010.
- [11] XU T T. Research on the purification process and mechanism of superalloy K465 and DZ40M [D]. Shenyang Ligong University, 2010.
- [12] 刘录凯,王林珠,冉佳乐. 镍基高温合金中夹杂物的研究现状及进展[J]. 山东化工, 2021, 50(17):90-92.
- [13] LIU L K, WANG L Z, RAN J L. Research status and progress of inclusions in nickel-based superalloys [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(17):90-92.
- [14] 张利冲,许文勇,李周,等. 镍基高温合金GH4169粉末表面氧化特性[J]. 航空材料学报, 2020, 40(6):1-7.
- [15] ZHANG L C, XU W Y, LI Z, et al. Surface oxidation

characteristics of nickel-based superalloy GH4169 powder[J]. Chinese Journal of Aerospace Materials, 2020, 40(6):1-7.

[10] 郭振涛. 新型镍基单晶高温合金初熔组织的形成[J]. 科技风, 2020(32):174-175, 184

GUO Z T. Formation of the initial melting structure of a new type of nickel-based single crystal superalloy [J]. Science & Technology Wind, 2020(32):174-175, 184

[11] HU D, WANG T, MA Q, et al. Effect of inclusions on low cycle fatigue lifetime in a powder metallurgy nickel-based superalloy FGH96 [J]. International Journal of Fatigue, 2019 (118):237-248.

[12] 张波, 彭明耀, 曾斌, 等. 合金弹簧钢 51CrV4 中镁铝尖晶石夹杂行为研究[J]. 炼钢, 2017, 33(6):57-61, 77.

ZHANG B, PENG M Y, ZENG B, et al. Study on the inclusion behavior of magnesium-aluminum spinel in alloy spring steel 51CrV4[J]. Steelmaking, 2017, 33(6):57-61, 77.

[13] 葛允宗, 王建军, 颜慧成, 等. 含 Ti 齿轮钢中 TiN 夹杂析出热力学及其控制[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(5):50-54.

GE Y Z, WANG J J, YAN H C, et al. Thermodynamics and control of TiN inclusion precipitation in Ti-containing gear steel [J]. Iron&Steel Vanadium & Titanium, 2012, 33(5):50-54.

[14] 国家金属制品质量监督检验中心. 金属材料线材缠绕试验方法[S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局中国国家标准化管理委员会, 2004:8.

National Quality Supervision and Inspection Center for Metal Products. Test Method for Winding of Metal Materials Wire [S]. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2004: 8.

[15] LONG F, YOO Y S, SEO S M, et al. Effect of Re addition and withdrawal rate on the solidification behavior of directionally solidified superalloy AM3 [J]. Journal of Materials Science&Technology, 2011, 27(2):101-6.

[16] 赵鸿燕, 冯浩, 李花兵, 等. 渣系对 Ar 气保护电渣重熔 Ni-Cr-Co 基高温合金质量的影响[J]. 材料与冶金学报, 2013, 12(2):119-123.

ZHAO H Y, FENG H, LI H B, et al. The influence of slag system on the quality of Ni-Cr-Co-based superalloys remelted by Ar gas-protected electroslag [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2013, 12(2):119-123.

[17] 傅杰. 特种冶炼[M]. 冶金工业出版社, 1982.

FU J. Special smelting [M]. Metallurgical Industry Press, 1982.

[18] CHOL N, PARK N, KIM J K, et al. Influence of manufacturing conditions on inclusion characteristics and mechanical properties of FeCrNiMnCo alloy [J]. Metals, 2020, 10 (10): 1286.

[19] GASKELL D R, LAUGHLIN D E. Introduction to the Thermodynamics of Materials[M]. CRC Press, 2017.

[20] 朱鸥. 航空发动机用单晶叶片铸造缺陷解读[J]. 铸造技术, 2017, 38(5):986-989.

ZHU O. Interpretation of casting defects of single crystal blades for aero engines [J]. Casting Technology, 2017, 38 (5) : 986-989.

[21] 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]. 北京科技大学, 2020.

SHI X. Basic research on solidification and segregation behavior of large IN718 nickel-based alloy ingots by electroslag remelting [D]. University of Science and Technology Beijing, 2020.

[22] 郭晓倬, 董建新, 胡尧和, 等. 高温合金冶炼过程中泡沫陶瓷过滤器的作用[J]. 北京科技大学学报, 1999(3): 245-247, 250

GUO X Z, DONG J X, Hu Y H, et al. The role of foam ceramic filters in the smelting process of superalloys [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1999(3) : 245-247, 250

[23] 赵运兴, 马德新, 魏剑辉, 等. 单晶高温合金中条纹晶缺陷形成原因研究[J]. 铸造技术, 2021, 42(3):163-167.

ZHAO Y X, MA D X, WEI J H, et al. Research on the formation causes of striped crystal defects in single crystal super alloys [J]. Casting Technology, 2021, 42(3) : 163-167.

[24] LIU N, CHENG G, ZHANG L F, et al. Composition evolution and deformation of different non-metallic inclusions in a bearing steel during hot rolling [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(4) : 552-562.

[25] ELAHI M A, SHABESTARI S G. 熔化和热处理条件对 A356 铝合金冲击韧性的影响(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(4) : 956-965.

ELAHI M A, SHABESTARI S G. The influence of melting and heat treatment conditions on the impact toughness of A356 aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26 (4) : 956-965.

[26] LEE D C. Effect of T6 heat treatment on the defect susceptibility of fatigue properties to microporosity variations in a low-pressure die-cast A356 alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2013(559) : 496-505.

[27] 谷雨, 杨树峰, 赵朋, 等. 镍基高温合金 GH4738 的凝固偏析和碳化物析出行为[J]. 中国冶金, 2021, 31(7) : 13-21.

GU Y, YANG S F, ZHAO P, et al. Solidification segregation and carbide precipitation behavior of Nickel-based superalloy GH4738 [J]. China Metallurgy, 2021, 31(7) : 13-21.

[28] 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.

WANG Z X, HUANG S, ZHANG B J, et al. Research on point segregation of highly alloyed GH4065 Nickel-based deformable superalloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55

(3):417-426.

[29] 李向阳,吴旺朋,陈艳,等. 高速车轮钢包裹类非金属夹杂物研究[J]. 钢铁钒钛,2021,42(3):199-204.

LI X Y, WU W P, CHEN Y, et al. Research on non-metallic inclusions wrapped in high-speed wheel steel [J]. Iron & Steel Vanadium & Titanium, 2021, 42(3):199-204.

[30] 薛正良,金武涛,雷家柳,等. 帘线钢生产中钛夹杂的析出与控制[J]. 炼钢,2016,32(4):23-32.

XUE Z L, JIN W T, LEI J L, et al. Precipitation and control of titanium inclusions in the production of cord steel [J]. Steelmaking, 2016, 32(4):23-32.

[31] 肖东平,周扬,付建辉,等. GH141合金的凝固偏析特性及均匀化处理[J]. 金属热处理,2022,47(5):141-147.

XIAO D P, ZHOU Y, FU J H, et al. Solidification segregation characteristics and homogenization treatment of GH141 alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(5):141-147.

[32] LIANG L, ZHANG B, YAN L, et al. Evolution behavior of inclusions via oxide metallurgy of NM450 ultrahigh-strength steel [J]. Materials Research Express, 2021, 8(10):1-8.

[33] 王敏,包燕平,崔衡,等. IF钢中 Al_2O_3 -TiN复合夹杂生成机理研究[J]. 钢铁研究学报,2010,22(7):29-32,55.

WANG M, BAO Y P, CUI H, et al. Research on the formation mechanism of Al_2O_3 -TiN composite inclusions in if steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 22(7):29-32,55.

[34] 张勇,李鑫旭,韦康,等. 三联熔炼GH4169合金大规格铸锭与棒材元素偏析行为[J]. 金属学报,2020,56(8):1123-1132.

ZHANG Y, LI X X, WEI K, et al. Element segregation behavior of large-sized ingots and bars of GH4169 alloy smelted by Sanlian [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(8):1123-3112.

[35] 李会芳. A-USC镍基合金组织演化及蠕变变形影响研究[D]. 大连理工大学,2019.

LI H F. Research on microstructure evolution and creep deformation influence of A-USC nickel-based alloy [D]. Dalian

University of Technology, 2019.

[36] 吴海利,张长春,孙林根,等. 617镍基合金蠕变-疲劳交互力学行为与微观组织演变[J]. 机械工程学报,2022,58(8):170-180.

WU H L, ZHANG C C, SUN L G, et al. Creep-fatigue interaction mechanical behavior and microstructure evolution of 617 nickel-based alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(8):170-180.

[37] DENG Z, CHEN L, SONG G, et al. Formation and evolution of non-metallic inclusions in ti-bearing Al-killed steel during secondary refining process [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 51(1):173-186.

[38] 张玉周,皮钧. 脆性材料延性域加工研究进展[J]. 集美大学学报(自然科学版),2013,18(1):38-47.

ZHANG Y Z, PI J. Research progress on ductile domain processing of brittle materials [J]. Journal of Jimei University (Natural Science Edition), 2013, 18(1):38-47.

[39] 李丽,谢国君,徐秋发,等. 3J53弹簧表面裂纹缺陷原因分析[J]. 宇航材料工艺,2018,48(1):81-84.

LI L, XIE G J, XU Q F, et al. Analysis of the causes of surface crack defects of 3J53 spring [J]. Aerospace Materials and Technology, 2018, 48(1):81-84.

[40] 张龙,李仕力,刘海英,等. 弹簧钢表面裂纹氧化行为的研究[J]. 天津冶金,2016,(4):32-34,38

ZHANG L, LI S L, LIU H Y, et al. Research on the oxidation behavior of surface cracks in spring steel [J]. Tianjin Metallurgy, 2016(4):32-34,38

[41] 高文香,高玉周. 55CrSi弹簧断裂原因分析[J]. 失效分析与预防,2021,16(4):261-265.

GAO W X, GAO Y Z. Analysis of the fracture causes of 55CrSi springs [J]. Failure Analysis and Prevention, 2021, 16(4):261-265.

[42] 史霞,刘志莹,王道勇. 发动机气门弹簧断裂原因分析[J]. 理化检验(物理分册),2016,52(3):197-201.

SHI X, LIU Z Y, WANG D Y. Analysis of the causes of engine valve spring fracture [J]. Physical and Chemical Inspection (Physics Volume), 2016, 52(3):197-201.