

引文格式: 张莹. 镍基粉末高温合金中碳、氧化物的遗传演变及对组织性能的影响[J]. 航空制造技术, 2021, 64(23/24): 80-86, 93.
ZHANG Ying. Heredity and evolution of carbide and oxide in nickel-based PM superalloys and their effect on microstructure-properties[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(23/24): 80-86, 93.

镍基粉末高温合金中碳、氧化物的遗传演变及对组织性能的影响*

张莹

(1. 钢铁研究总院, 北京 100081;
2. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081)

[摘要] 粉末高温合金由于其独特的生产工艺, 往往在成形件中会产生夹杂物、原始颗粒边界(PPB)等缺陷。根据镍基粉末冶金(Powder metallurgy, PM)高温合金制造的主要工艺流程追溯碳化物、氧化物的遗传演变过程, 分析其对成形件组织结构、裂纹扩展速率及疲劳寿命的影响, 从而获得抑制消除缺陷的方案。

关键词: 镍基粉末高温合金; 碳化物; 氧化物; 遗传演变; 断裂韧性; 疲劳寿命

Heredity and Evolution of Carbide and Oxide in Nickel-Based PM Superalloys and Their Effect on Microstructure-Properties

ZHANG Ying

(1. Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China;
2. CISRI-Gaona Materials & Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

[ABSTRACT] Due to its unique production process, powder metallurgy superalloy often produces defects such as inclusions, previous particle boundary (PPB) in the formed parts. In this paper, the heredity and evolution of carbide and oxide in alloy were traced back according to the manufacturing process of Ni-based powder metallurgy (PM) superalloy, and their effects on microstructure, crack growth rate and fatigue life of formed parts were analyzed. The schemes of restraining and eliminating defects were proposed.

Keywords: Ni-based PM superalloy; Carbides; Oxides; Heredity and evolution; Fracture toughness; Fatigue life

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.23/24.080

粉末冶金高温合金较传统的铸造变形高温合金, 具备成分均匀、晶粒细小、屈服强度高、抗疲劳性强等优势, 成为业内公认的新型高温合金首选材料^[1]。目前国外已有三代粉末高温合金研制成功并实际应用, 我国有两代粉末高温合金得到实际应用, 第三代、四代正在研制中。随着航空发动机的不断发展, 对涡轮盘等热端部件的强韧性、抗疲劳性、可靠性及耐久性提出了更高的要求。为满足不断发展的高质量航空材料的需求, 研究人员一直在不懈地努力, 针对粉末冶金工艺中不可忽视

的原始颗粒边界、夹杂物等缺陷展开深入的研究^[2-6], 最大限度地抑制和消除缺陷, 提高材料的质量。

本研究对等离子旋转棒料制粉工艺(Plasma rotary electrode process, PREP)制造的镍基高温合金粉末中的夹杂物做过系统的研究^[7], 结果表明, 氧化物是夹杂的主要类型。张莹等^[8-9]研究表明, PPB 主要由碳、氧化物形成, 从该类 PM 合金的低周疲劳试验结果发现, 形成裂纹源的夹杂物占 80%, 粉末颗粒间断裂占 15%。追溯 PM 高温合金缺陷的来源和演变形成机制对于抑制它们的产

* 基金项目: 国家科技重大专项(2017-VI-0008-0078)。

生很有必要。

粉末冶金高温合金的主要工艺流程是：母合金冶炼—雾化制粉—粉末处理—粉末装套—热成形—热处理。本研究采用真空感应冶炼(Vacuum induction melting, VIM)母合金棒料；等离子旋转电极工艺制粉，即在真空度达到 0.133Pa 后，充入高纯($\text{O}_2 \leq 2 \times 10^{-6}$, $\text{H}_2\text{O} \leq 5 \times 10^{-6}$)的Ar和He混合气体，在惰性气体介质中，通过等离子弧电流雾化旋转棒料制粉；在压力约 0.13MPa 高纯惰性气体保护下，通过筛分和静电分离去除夹杂物，处理获得成品粉末；粉末在真空度不低于 $8 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 、温度约 400°C 下流动并装入包套，进行充分脱气，振动密实后，封焊包套口；然后在稍高于合金 γ' 完全溶解温度下进行热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)成形，毛坯经粗加工后进行固溶+时效热处理。

本研究按镍基粉末高温合金的制造工艺溯源，对碳、氧化物的遗传演变进行系统的分析阐述。

1 镍基高温合金母合金中的碳、氧化物

图1为VIM工艺冶炼FGH4097母合金棒料横截面中部的组织形貌。图1中枝晶和枝晶间主要析出MC(质量分数0.337%)、Laves和 M_3B_2 (总质量分数

为0.129%)。局部区域有粗大的(Nb Ti)C析出相聚集(图1(b)和(c))，分别由图2的X衍射测试以及图3的EDS能谱分析得知。

FGH4097母合金缩孔形貌如图4(a)所示，对其合金棒料基体(图4(b))和中心缩孔内杂质做EDS能谱分析，孔内杂质可判断为 Al_2O_3 (图4(c))，以及含C、O、Al、Si、Nb、Ti、Cr、Fe等元素的混合碳、氧化物(图4(d))。由图5(a)该棒料表面缺陷杂质进行EDS能谱分析得知，其缺陷杂质为MgO(图5(b))和含C、O、Al、Mg、Nb、Ti、Hf等元素的混合碳、氧化物(图5(c))。

母合金中含Al、Mg、Si等的杂质来源于熔炼和浇注过程。冶炼过程中合金熔体的氧化是一种复杂的多相反应，包括炉气与熔体之间以及坩埚与熔体之间的反应。原材料中的气体氧在高温熔炼中会与加入的元素反应，产生 Al_2O_3 、 SiO_2 等内生夹杂物。同时，在 $1500\sim 1600^\circ\text{C}$ 真空熔炼过程中合金熔液与炉衬充分接触，炉衬分解出氧直接进入熔池，与Al、Ti等亲氧元素反应生成氧化物。此外，所研究的合金在真空感应冶炼中是采用碳进行脱氧，由于真空冶炼时Mg的蒸汽压高而溶解度低，MgO坩埚分解的供氧速度 $\text{MgO} \rightarrow [\text{Mg}] + [\text{O}]$ 要大于 $[\text{C}] + [\text{O}] \rightarrow \text{CO}$ 反应的脱氧速度^[10]。由此分析，当C与

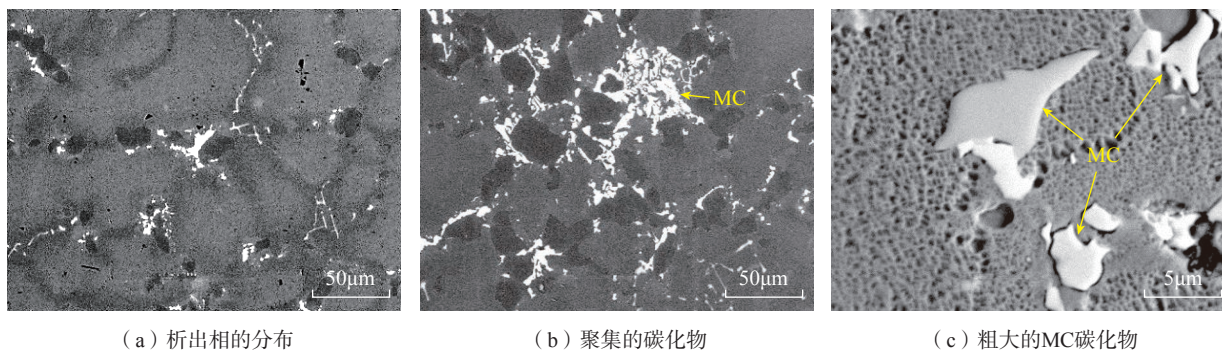


图1 $\phi 50\text{mm}$ FGH4097母合金横截面的析出相

Fig.1 Precipitate phases distribution on cross-section of $\phi 50\text{mm}$ FGH4097 master alloy

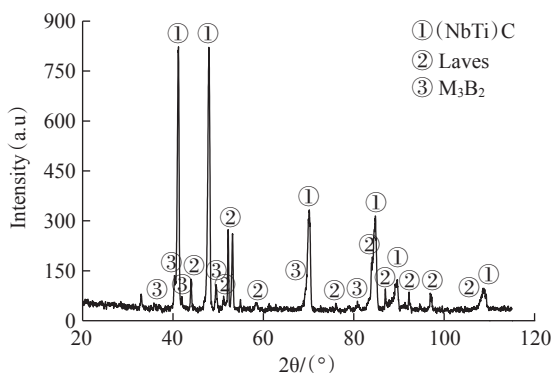


图2 FGH4097母合金中析出相的X衍射图

Fig.2 Precipitated phase XRD graph in FGH4097 master alloy

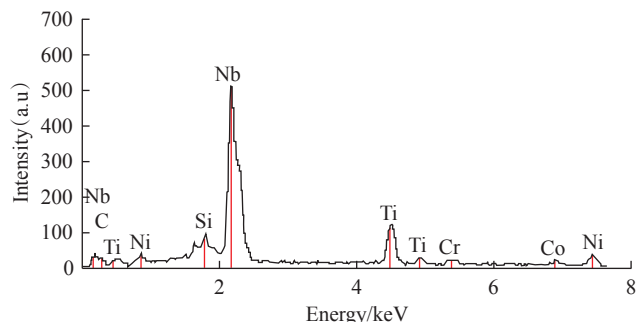
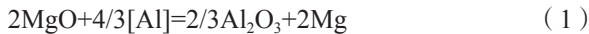


图3 FGH4097母合金中(NbTi)C相EDS能谱

Fig.3 EDS spectrums of (NbTi) C in FGH4097 master alloy

O 的脱氧反应未能达到平衡状态时,坩埚与合金熔体中的 Al 会发生如下反应,生成 Al_2O_3 夹杂物:



如果产生的氧化物熔渣不能充分上浮,就会保留在熔液中。

由于浇注过程与大气接触,合金溶液中的 Al 等与氧亲和力和强的元素会发生二次氧化反应。同时合金溶液与炉渣以及坩埚(MgO)、分流器剥落的耐火材料(由 $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot SiO_2$ 和 Al_2O_3 组成^[7])之间发生多元反应^[11],聚合形成以 Al、Si、Mg 为主的复杂结构的混合氧化物。

为减少上述母合金中的熔渣,必须采用高纯原材料,严格控制气体含量,精确控制化学成分;选择热稳定性强的炉衬材料,控制真空度和熔池温度减少炉衬分解;把控制好精炼温度和真空度以及脱氧剂量,使脱氧反应达到脱氧剂与氧的平衡状态;在合金化阶段,控制好加速

碳及合金元素均匀化溶解的温度、时间等参数,调整好浇注温度和冷却速度,以细化碳化物尺寸,避免产生聚集粗大的 MC 碳化物;改进浇铸工艺,减少熔液二次氧化,以及耐火材料对合金熔液的污染。

2 PREP 工艺雾化粉末中的夹杂物

PREP 工艺是通过等离子弧熔化高速旋转的母合金棒料端部,在离心力作用下合金液滴喷射,并在惰性气体介质中以约 $10^4 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ 的速度,靠表面张力的作用凝固成球形的颗粒。粉末具备球形度好、表面光亮、洁净,物理工艺性能好的特性。由于 PREP 制粉过程中液滴的分离和结晶是在缺乏明显过热度快速冷却的条件下进行^[12],所以 VIM 冶炼的母合金中聚集的大尺寸、高熔点的 MC 型碳化物将会遗传进入雾化的合金粉末中。由上面 1 节的分析,母合金熔炼浇注中产生的各类氧化物

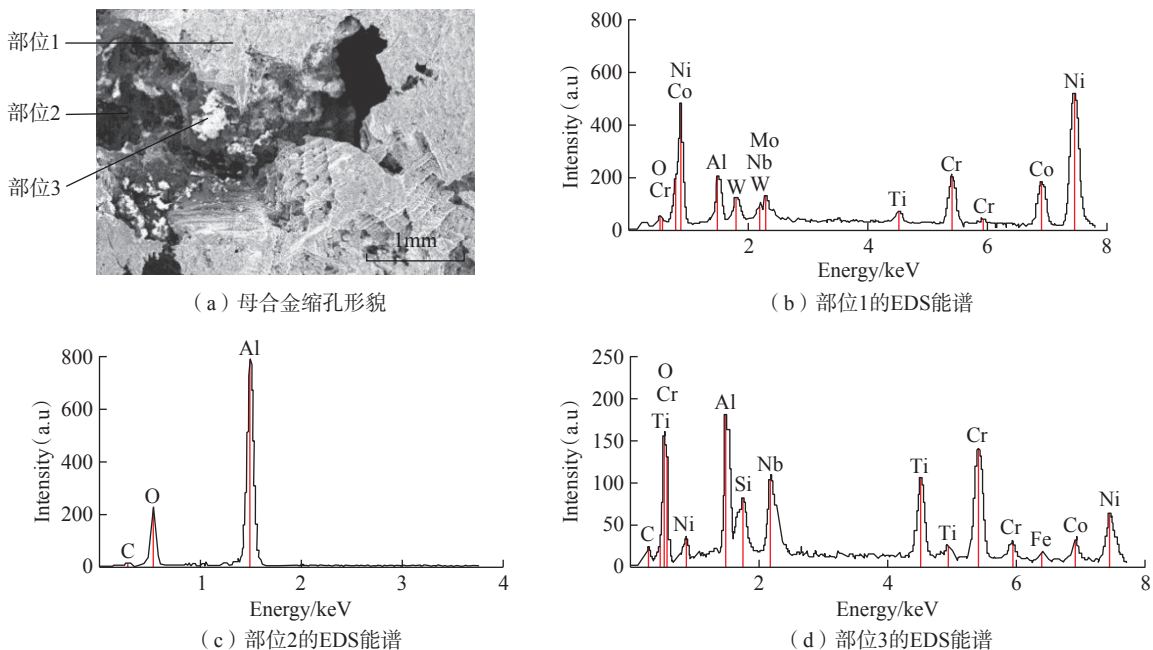


图 4 FGH4097 母合金棒中心缩孔位置 EDS 能谱
Fig.4 EDS energy spectrum of center shrinkage cavity of FGH4097 master alloy rod

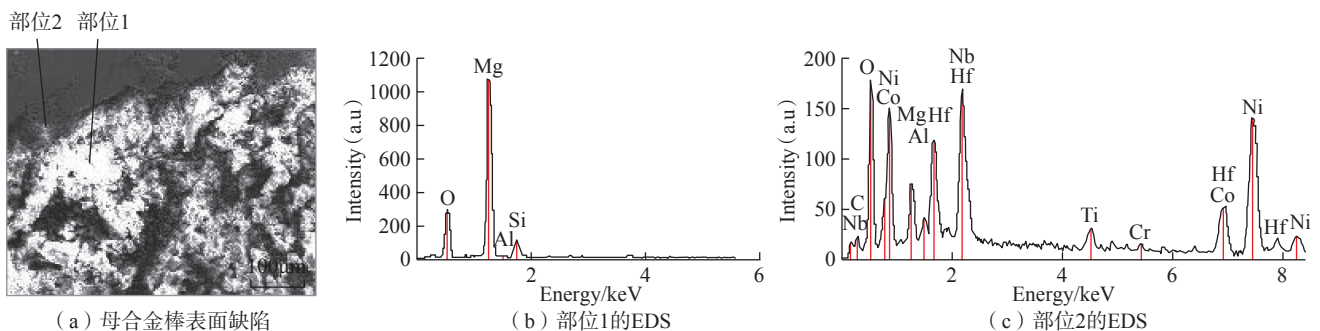


图 5 FGH4097 母合金棒表面缺陷 EDS 能谱
Fig.5 EDS energy spectrum of surface defects of FGH4097 master alloy rod

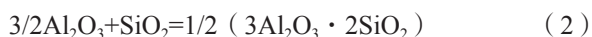
有可能进入雾化的粉末中成为夹杂物。

粉末中的夹杂物如图6所示,按来源主要分为陶瓷、熔渣和粉黏夹杂物异常颗粒。

2.1 陶瓷类

陶瓷类夹杂物呈球状、液滴状和多边棱角块状,EDS分析^[7]其主要是含O、Si、Al的氧化物。在浇注过程中,少量未过滤掉的炉衬渣及过滤网下方浇注口的耐火材料渣被卷入合金锭模中,多数属于外来夹杂物。

图6(a)^[7]为典型球形Si、Al复合氧化物夹杂。合金原料在高温熔炼中生成的 Al_2O_3 、 SiO_2 或与炉衬中的氧化硅渣聚集形成硅酸铝^[13]夹杂物:



在浇注快速凝固中液态的硅酸铝来不及结晶,通常以过冷液体玻璃态的形式存在,表面张力使其收缩而形成球状。或者是在雾化制粉过程中,高温等离子弧使母合金棒端面的陶瓷夹杂物以熔融态离心飞射,然后快速冷却形成球状。

2.2 熔渣

由图6(b)可见,熔渣类夹杂物形状不规则且棱角光滑,EDS分析^[7]其主要为Al、O以及Al、Si和少量Mg、Ti、Cr、Fe的混合氧化物。与母合金浇注过程中多元反应生成的复杂氧化产物成分基本一致。局部存在合金枝晶组织,是合金棒料中的夹杂物在雾化制粉时与熔融态的合金黏连形成。

2.3 异常颗粒

文献[14]的研究结果表明,合金粉末中存在粉末与升华物、陶瓷、熔渣黏连为一体的异常颗粒。升华物是在制粉过程中形成的,在惰性气体介质中等离子束使母合金棒端部达到熔化的温度,此时,合金中低熔点的Mg、Cr等元素极易蒸发,随后附着在未完全凝固的粉末表面。当雾化气氛中含有C、O时,升华的元素会与其生成氧化物和碳化物,并附着在粉末颗粒表面。根据EDS和EPMAX电子探针以及X衍射测试结果分析,粉末黏连的含O、Si、Al陶瓷夹杂与母合金熔炼炉浇注

口的耐火材料成分($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 SiO_2 、 Al_2O_3)一致。如图6(c)所示,黏连熔渣的颗粒是主要含Al、Mg、Si的氧化物,与母合金中的熔渣成分一致。

粉黏夹杂颗粒的形成与制粉工艺和母合金中夹杂物的成分及其熔点、表面张力、膨胀系数等性质有密切关系,主要分析如下。

(1)PREP雾化过程中,母合金中少量稳定的杂质有可能进入未凝固的合金颗粒或黏附其表面。由于两者热膨胀系数的差异引起热应力^[15],撞击瞬间被局部变形释放应力后黏连为一体。

(2)母合金棒料的中心缩孔残留有气体、耐火材料及复合氧化物夹杂,在雾化制粉时释放出污染熔融的金属液滴。气体氧使金属液滴表面发生氧化反应生成“黑粉”^[7]。夹杂与离心雾化飞射中的合金液滴碰撞,形成黏夹杂的异常颗粒。

夹杂物和熔融的合金液滴发生黏附,可用关系式^[16]表达:

$$W_{黏} = \sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_{12} \quad (3)$$

式中, $W_{黏}$ 为黏附力; σ_1 、 σ_2 、 σ_{12} 分别代表各自的表面张力及二者接触时质点间产生的界面张力。 $W_{黏}$ 值越大,黏附越紧密。

3 碳、氧化物在成形件中的表征

3.1 夹杂物

氧化物夹杂在成形件制备工艺过程中的遗传特征、变形行为较复杂,不仅取决于夹杂物的类型,而且与其成分及变形温度密切相关。张莹等^[17]和周晓明^[18]由试验结果得知,具有较高熔点的 SiO_2 、 Al_2O_3 、MgO在HIP成形后的合金中仍保持原始形貌。 Al_2O_3 、MgO与基体为机械结合,界面有微裂纹,没有边界反应区,对基体显微硬度没影响。 SiO_2 由于硬度较高,在HIP过程中随粉末颗粒的屈服变形嵌入基体中,发生化学反应: $4[\text{Al}] + 3\text{SiO}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3[\text{Si}]$, $[\text{Ti}] + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{TiO}_2 + [\text{Si}]$,改变了界面的结合,形成贫 γ' 区,使界面的显微硬度降低。

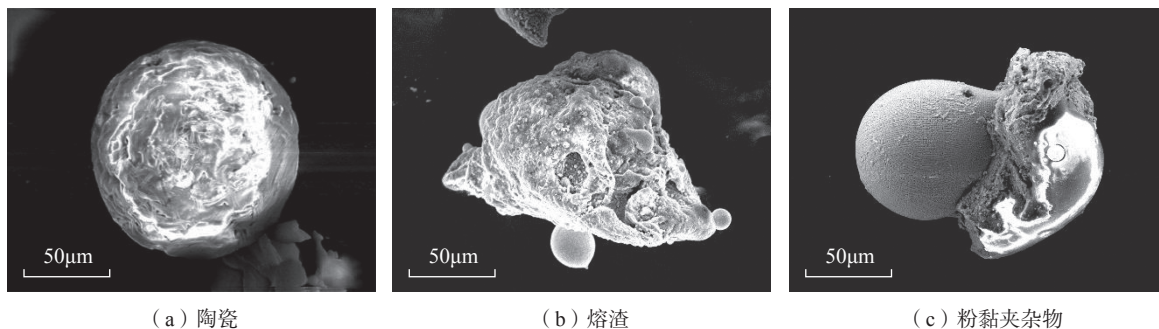


图6 镍基高温合金粉末中的夹杂物形貌

Fig.6 Inclusions morphologies in powders of Ni-based superalloy

在粉末高温合金成形件中发现,由母合金遗传的硅酸铝夹杂与基体中Al、Ti强氧化物生成元素形成“复合”氧化物^[18],从而增加了 γ' 相和基体之间共格畸变能,形成明显的贫 γ' 区(图7)^[17]。在等温锻造过程中夹杂物在外力的作用下发生破碎,在一维方向上尺寸变大。有反应区的夹杂物产生局部断裂,无反应区的 Al_2O_3 类夹杂则完全断裂呈链状分布。

3.2 原始颗粒边界

PM合金中的PPB组织与成形前粉末表面的状态有直接关系。镍基高温合金中MC型碳化物的稳定温度高达1300℃,在稍高于 γ' 相完全固溶温度下HIP,母合金遗传到粉末中的大MC不会消除。制粉中形成的氧化“黑粉”、黏结着碳、氧化物的异常颗粒将对粉末的密实产生影响。由于粉末在整个HIP过程中是各向等轴受力变形,因此不利于颗粒表面氧化膜的破碎。在HIP中粉末表面的氧化物质点促使了复杂的 $(Ti, Nb)C_{1-x}O_x$ 碳氧化物生成^[19]。同时粉末表面亚稳态的碳化物将发生 $M_6C \rightarrow MC$ 。

在HIP过程中随着 γ' 相的析出,其周围不断富集出Ti、Nb等MC型碳化物形成元素;当这些元素达到一定的浓度时,便有 $(NbTi)C$ 碳化物析出。在随后的热处理中,这些MC相未能完全溶入基体。当时效温度在750~950℃时, M_6C 相的析出达到峰值,MC型碳化物将发生蜕化反应 $(MC+\gamma \rightarrow M_6C+\gamma')$ ^[20],析出少量 M_6C 。如图8所示^[8],在HIP成形件中块状MC和长条

状 M_6C 沿颗粒边界呈断续状分布。

如图9所示,少量“黑粉”在HIP成形和热处理后颗粒界面上仍存在Al、Mg、Hf等稳定的氧化物,使合金颗粒间的界面原子扩散受到阻碍,原始颗粒边界较完整地保留在合金中^[8]。

PPB组织的改善、消除手段主要有:(1)调整优化合金成分,控制碳、氧含量,添加Hf、Ta等非表面偏析的强碳化物形成元素,使稳定的MC弥散分布在颗粒内部。(2)热成形前,粉末进行真空高温动态脱气,去除表面吸附的气体氧,减少PPB析出物的形核因素。(3)采用粉末预热处理,将松散的粉末在 $M_{23}C_6$ 型碳化物稳定温度下预热处理。在HIP之前,颗粒表面和内部形成均匀稳定的碳化物质点,消除碳化物在颗粒表面析出和长大的趋势。(4)采用两级HIP工艺,即在~1050℃保温析出 $M_{23}C_6$,使其在颗粒内长大,再升到HIP终压温度成形。颗粒内的碳化物来不及在边界重新析出,抑制合金元素在粉末表面偏析。(5)SS-HIP工艺,即在略低于固相线温度下HIP,使PPB析出物溶解。(6)通过挤压、等温锻造工艺破碎PPB。

4 粉末高温合金HIP成形件的力学断裂分析

PM高温合金中的夹杂物和PPB组织对其断裂韧性、低周疲劳寿命影响较大。

4.1 颗粒间断裂对裂纹扩展速率的影响

粉末高温合金成形件中存在原始颗粒边界组织,在力学断口上呈现出颗粒间断裂。裂纹扩展试验结果表明^[21],随着试样中“PPB”增多,裂纹失稳扩展的临界应力强度因子幅值 ΔK (断裂韧性)明显降低。图10中试样1、试样2和试样3分别代表3类存在不同程度“PPB”的样品,其中试样3中的“PPB”最严重。在650℃保载90s的试验条件下,试样3的疲劳循环周次最短,裂纹孕育和萌生几乎没有明显的界限,裂纹一旦产生,便以极快的速率扩展并多数沿颗粒间断裂,其“PPB”和颗粒间断裂形貌见图11。

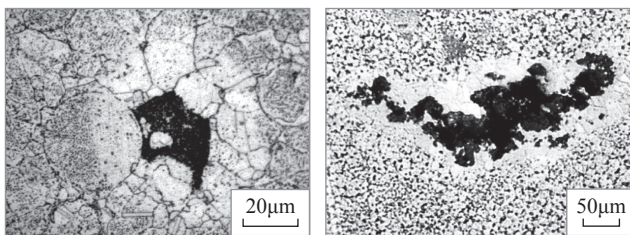


图7 FGH4095合金热等静压成形和锻件中的夹杂物形貌
Fig.7 Inclusions morphologies in hot isostatic pressing and forging of FGH4095 alloy

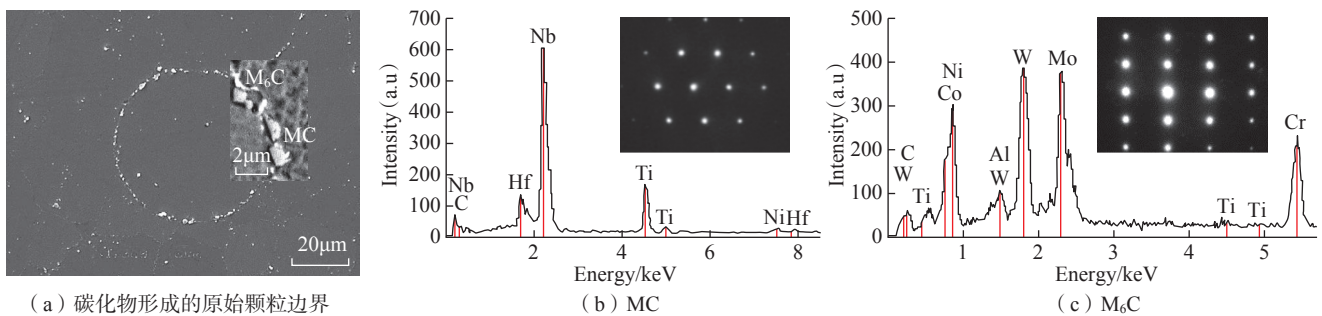


图8 粉末高温合金中PPB形貌及析出相
Fig.8 PPB morphology and precipitate phases in PM superalloy

由图8和9中颗粒边界上析出物的TEM电子衍射花样和EDS能谱分析^[8]得知,合金中原始颗粒边界上的析出物主要是含Nb、Ti、W、Mo、Cr、Hf等元素的MC、M₆C型碳化物及少量Al、Mg、Hf氧化物。在HIP过程中粉末颗粒边界形成类似于孔隙的薄弱区,使该界面的断裂韧性K_{IC}值相对降低,极易诱发萌生裂纹。

由关系式 $K_{IC} \approx \sqrt{2\sigma_s E \lambda}$ ^[22]推断,发生在原始颗粒边界的裂纹尖端扩展的断裂韧性,不仅取决于屈服强度 σ_s 、弹性模量 E ,还与颗粒边界上的碳化物、氧化物的密集程度 λ 有关。在裂纹扩展过程中,颗粒边界不连续的析出物将会阻碍位错运动,并引起蠕变位错在该区域塞积。颗粒边界上的碳、氧化物尺寸越大,排列越密集,越容易产生应力集中。当裂纹尖端的应力达到颗粒界面的断裂韧性时,便发生失稳、瞬断,最终在断口上呈现不同程度的颗粒间断裂。

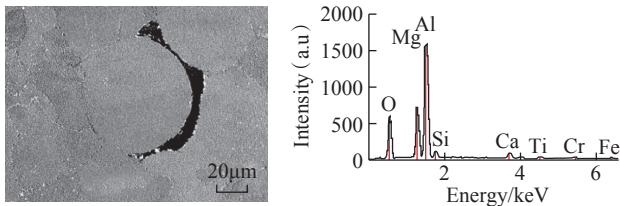


图9 颗粒边界上的氧化物及其EDS能谱分析

Fig.9 Oxides and its EDS spectrum on particle boundaries

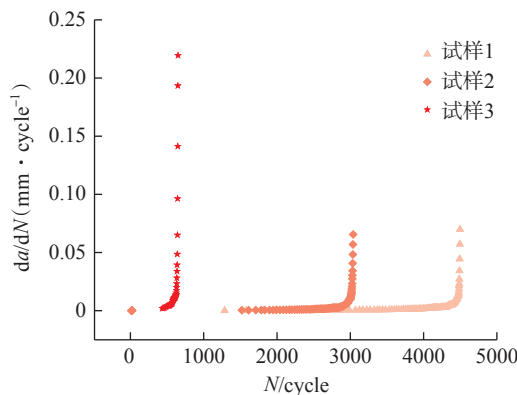
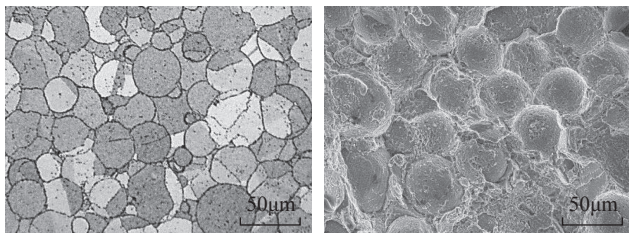


图10 PPB对疲劳裂纹扩展速率和疲劳寿命的影响

Fig.10 Effect of PPB on fatigue crack growth rate and fatigue life



(a) PPB

(b) 颗粒间断裂

图11 试样3的原始颗粒边界和颗粒间断裂形貌

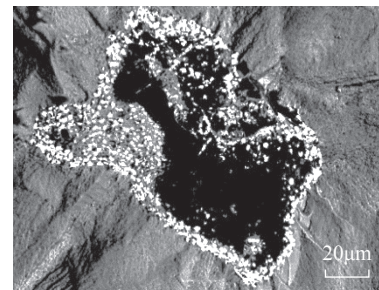
Fig.11 Morphologies of PPB and inter-particle rupture in sample 3

4.2 夹杂物对低周疲劳寿命的影响

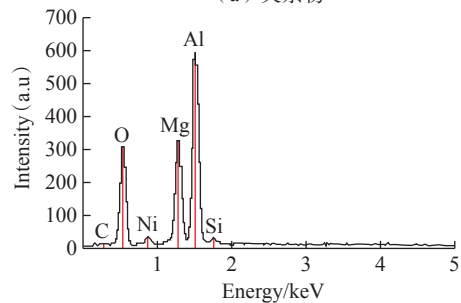
由试验结果得知,镍基粉末高温合金低周疲劳裂纹源分为平台、粉末颗粒、夹杂物3种类型,统计分析得知,夹杂物对疲劳寿命的影响最严重。

如图12所示,FGH4097合金中夹杂物(图12(a))萌生的裂纹源多数是混合类型的夹杂物,含C、O、Mg、Al、Si等元素的黑色熔渣(图12(b)),其周围分布着含O、Hf、Ce为主的白色氧化物粒子(图12(c))。由于裂纹源的夹杂物并非单一的氧化物,有复杂的化学式,所以难以精确地测定其物理性能。夹杂物和合金基体具有不同的线膨胀系数和弹性模量,使二者的界面极易萌生裂纹。裂纹源处夹杂物的物理特征取决于其中的主体氧化物。夹杂物的弹性模量、线膨胀系数和基体相差越大,越易形成应力集中。在低周疲劳试验过程中,夹杂物与基体脱开或自身疲劳损伤之后,便在原来夹杂物处形成空洞,导致疲劳裂纹生成。

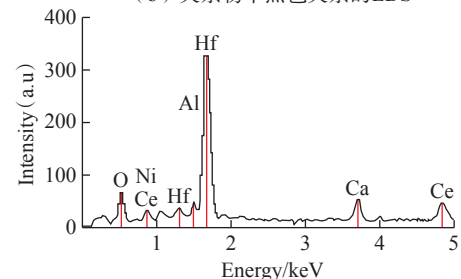
由Paris公式 $da/dN = c(\Delta K)^{n[9]}$ 可得出,疲劳裂纹扩展速率 da/dN 主要受控于裂纹尖端的应力强度因子范围 ΔK , c 为常数。裂纹优先在垂直于拉应力方向的夹杂



(a) 夹杂物



(b) 夹杂物中黑色夹杂的EDS



(c) 夹杂物中白色夹杂的EDS

图12 疲劳裂纹源上的夹杂物形貌及其EDS能谱

Fig.12 Micrograph of failure origin inclusion and EDS spectrum

物尖角处萌生,其裂纹扩展速率要比球状的异常粉末颗粒快。裂纹尖端曲率半径越小,裂纹扩展越快,其疲劳寿命越低。因而,在尺寸和位置都相同的情况下,夹杂物裂纹源对试样疲劳寿命的影响程度大于粉末颗粒间断裂。

5 结论

(1)真空感应冶炼的母合金中存在大尺寸、聚集的MC型碳化物,存在熔炼过程生成的氧化物炉渣以及浇注过程中多元反应产生的复合结构夹杂物。

(2)PREP工艺雾化的镍基高温合金粉末中存在陶瓷、熔渣等夹杂物,其成分与母合金中各类氧化物基本一致,是由母合金遗传。雾化过程中母合金棒缩孔释放残留氧气和夹杂,污染熔融的合金液滴,生成“黑粉”和粉黏夹杂的异常颗粒。

(3)在HIP成形件中母合金遗传的硅酸铝夹杂与合金中的强氧化元素反应形成“复合”氧化物,出现明显的贫 γ' 区。在等温锻造过程中夹杂物发生破碎,在一维方向上尺寸变大。

(4)在HIP过程中母合金遗传进入粉末的大尺寸和聚集的MC型碳化物没有完全溶解,在HIP中析出的MC及随后热处理生成的 M_6C 沿颗粒边界分布,形成“PPB”组织。在HIP成形和热处理后,个别颗粒界面上仍存在Al、Mg等稳定的氧化物。

(5)“PPB”组织降低粉末高温合金的断裂韧性。当颗粒边界上的碳、氧化物尺寸和排列密集度造成的应力集中达到界面的断裂韧度时,便呈现不同程度的颗粒间断裂。

(6)萌生低周疲劳裂纹源的缺陷多数源于母合金的混合碳、氧化物。疲劳裂纹扩展速率 da/dN 主要受控于裂纹尖端的 ΔK 。在相同的情况下,夹杂物裂纹源对疲劳寿命的影响程度大于粉末颗粒间断裂。

(7)从源头抓起,深入合金设计和成分优化的研究;采用高纯原材料,精确控制化学成分,通过优化坩埚等材料及采用多联冶炼等工艺改进,减少和细化母合金中的夹杂物;通过制粉工艺和设备的改进提高粉末的纯净度、降低粒度;通过成形、热处理工艺的设计改进消除、降低缺陷隐患。

参考文献

[1] 张国庆,张义文,郑亮,等.航空发动机用粉末高温合金及制备技术研究进展[J].金属学报,2019,55(9):1133-1144.
ZHANG Guoqing, ZHANG Yiwen, ZHENG Liang, et al. Research progress in powder metallurgy superalloys and manufacturing technologies for aero-engine application[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(9): 1133-1144.
[2] GARIBOV G S, GRITS N M. The way of creating new high strength powder metallurgy superalloy for promising aircraft engines[J].

Technology of Light Alloys, 2012(3): 35-43.

[3] KOSHELEV V J, SHOROSHEV Y G. Study of nonmetallic inclusions in the powder particles of nickel base superalloy[J]. Technology of Light Alloys, 2005(1-4): 78-82.

[4] 刘新灵,陶春虎.粉末高温合金缺陷特性及寿命预测方法研究进展和思考[J].材料导报,2013,27(5):92-96.

LIU Xinling, TAO Chunhu. Research progress and analysis on defect characteristic and life estimation of powder metallurgy superalloy[J]. Materials Review, 2013, 27(5): 92-96.

[5] CHEBOTAREV M S. Defects in the PM disks and their detection methods[J]. Technology of Light Alloys, 2008(2): 44-48.

[6] VOSTRIKO A V, GARIBOV G S. Investigation in the field of physico-mechanical properties and a structure of new Ni-base superalloy powder[C]//Proceedings of 11th International Conference on Hot Isostatic Pressing. Stockholm Sweden: The Swedish Steel Producers' Association Press, 2014.

[7] 张莹,张义文,吕日红,等.PREP工艺制造的镍基高温合金粉末中夹杂物的研究[J].中国有色金属学报,2017,27(10):2037-2045.

ZHANG Ying, ZHANG Yiwen, LÜ Rihong, et al. Study on inclusions in Ni-base superalloy powder by PREP[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(10): 2037-2045.

[8] 张莹,刘明东,孙志坤,等.“PPB”在热等静压成形镍基粉末高温合金中的表征[C]//第十四届中国高温合金年会论文集.北京:冶金工业出版社,2019.

ZHANG Ying, LIU Mingdong, SUN Zhikun, et al. Characterization of “PPB” in Ni-based PM superalloy by hot isostatic pressing[C]//Proceedings of 14th Chinese Symp on Superalloys. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2019.

[9] 张莹,张义文,张娜,等.粉末冶金高温合金FGH97的低周疲劳断裂特征[J].金属学报,2010,46(4):444-450.

ZHANG Ying, ZHANG Yiwen, ZHANG Na, et al. Fracture character of low cycle fatigue of PM superalloy FGH97[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(4): 444-450.

[10] 牛建平.纯净钢及高温合金制备技术[M].北京:冶金工业出版社,2009.

NIU Jianping. Purified steel and superalloy preparation technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.

[11] 姜锡山.钢中非金属夹杂物[M].北京:冶金工业出版社,2011.

JIANG Xishan. Nonferrous inclusion in steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.

[12] BELOV A F, ANOSHIKIN N F, FATKULLIN O H. Microstructure and properties of nickel-base PM superalloy[M]. Moscow: Metallurgical Press, 1984.

[13] 陈肇友.氧化物酸碱性强弱与复合氧化物的生成自由能:陈肇友耐火材料论文选[D].北京:冶金工业出版社,2011.

CHEN Zhaoyou. The acidity and alkalinity of oxide and formation free energy of composite oxide: Selected papers on refractories by Chen Zhaoyou[D]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.

[14] 张莹,黄虎豹,刘明东,等.PREP工艺制取镍基高温合金粉末中的异常颗粒[J].稀有金属材料与工程,2017,46(11):3485-3490.

ZHANG Ying, HUANG Hubao, LIU Mingdong, et al. Study on abnormal particles in Ni-base superalloy powder by PREP process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(11): 3485-3490.

(下转第93页)

Fatigue, 2018, 119: 69–77.

[10] LIU H, HUA D, WANG R, et al. Experimental and numerical investigations on the influence of cold expansion on low cycle fatigue life of bolt holes in aeroengine superalloy disk at elevated temperature[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132: 105390.

[11] 王燕礼, 朱有利, 曹强, 等. 孔挤压强化技术研究进展与展望[J]. 航空学报, 2018, 39(2): 021336.

WANG Yanli, ZHU Youli, CAO Qiang, et al. Process and prospect of research on hole cold expansion technique[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(2): 021336.

[12] EMAMI G Z, CHAKHERLOU T N. Numerical and experimental investigation of the effect of the cold expansion process on the fatigue behavior of hybrid (bonded-bolted) double shear lap aluminum joints[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 126: 30–43.

[13] HUANG Y, LI H, YANG X, et al. Improving the fatigue life of 2297–T87 aluminum-lithium alloy lugs by cold expansion, interference fitting, and their combination[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 67–77.

[14] ZHOU Z, FUA J, CAO Q, et al. Electromagnetic cold-expansion process for circular holes in aluminum alloy sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 248: 49–55.

[15] ZHOU Z, FUA J, CAO Q, et al. A novel hole cold-expansion method and its effect on surface integrity of nickel-based superalloy[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2020, 59: 129–137.

[16] MAXIMOV J T, DUNCHEVA G V, ANCHEV A P, et al. New method and tool for increasing fatigue life of a large number of small fastener holes in 2024–T3 Al alloy[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 2019, 41(4): 203–210.

[17] DUNCHEVA G V, MAXIMOV J T, GANEV N. A new conception for enhancement of fatigue life of large number of fastener holes in aircraft structures[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 2017, 40(2): 176–189.

[18] MAXIMOV J T, DUNCHEVA G V, AMUDJEV I M, et al. A new approach for pre-stressing of rail-end-bolt holes[C]//ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science. London: SAGE Publications, 2017: 2275–2283.

[19] WANG Y L, ZHU Y L, CAI Z H. Effect of ultrasonic impact treatment on the fatigue performance of cold expanded AA6061–T6 hole[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(1): 691–698.

[20] FARHANGDOOST K, HOSSEINI A. The effect of mandrel speed upon the residual stress distribution around cold expanded hole[J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 2184–2189.

[21] CAO Z, QIN Q. A study on driving interference-fit fastener using stress wave[C]//Materials Science Forum. Berne: Trans Tech Publications, 2006: 1–4.

[22] ZUO Y, CAO Z, ZHENG G, et al. Damage behavior investigation of CFRP/Ti bolted joint during interference fit bolt dynamic installation progress[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 111: 104454.

[23] JIANG H, ZENG C, LI G, et al. Effect of locking mode on

mechanical properties and failure behavior of CFRP/Al electromagnetic riveted joint[J]. Composite Structures, 2021, 257: 113162.

通讯作者: 曹增强, 教授, 博士, 研究方向为飞机装配与先进连接技术。

(责编 七七)

(上接第 86 页)

[15] 许并社. 材料界面的物理与化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

XU Bingshe. Physics and chemistry of materials interface[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

[16] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.

CHEN Jiayang. Steelmaking common chart data handbook[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.

[17] 张莹, 张义文, 宋璞生, 等. 镍基粉末高温合金中的夹杂物[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(11): 71–76.

ZHANG Ying, ZHANG Yiwen, SONG Pusheng, et al. Investigation on inclusion in the P/M nickel-based superalloy[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003, 15(11): 71–76.

[18] 周晓明. 粉末高温合金中非金属夹杂物的遗传特征及损伤力学行为研究[D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2006.

ZHOU Xiaoming. Genetic characteristic and damage mechanical behavior of non-metallic inclusions in P/M superalloy[D]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautical Materials, 2006.

[19] 毛建, 杨万宏, 汪武祥, 等. 粉末高温合金颗粒界面及断裂研究[J]. 金属学报, 1993, 29(4): 187–192.

MAO Jian, YANG Wanhong, WANG Wuxiang, et al. Particle boundary and fracture of powder metallurgy superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1993, 29(4): 187–192.

[20] 张莹, 张义文, 孙志坤, 等. 热处理工艺对一种镍基 P/M 高温合金组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(7): 37–43.

ZHANG Ying, ZHANG Yiwen, SUN Zhikun, et al. Effect of heat treatment processes on microstructure and properties of a P/M Ni-based superalloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(7): 37–43.

[21] 张莹, 张义文, 孙志坤, 等. PPB 对镍基粉末高温合金裂纹扩展行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(10): 3282–3288.

ZHANG Ying, ZHANG Yiwen, SUN Zhikun, et al. Influence of PPB on crack growth behavior of PM Ni-based superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(10): 3282–3288.

[22] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.

HUANG Peiyun. Powder metallurgy principle[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.

通讯作者: 张莹, 正高级工程师, 研究方向为粉末冶金高温合金。

(责编 七七)