

GH4169合金叶片叶身表面白条纹分析

汤浩, 李永斌, 张新强, 陈森, 刘依依

中国航发贵州黎阳航空动力有限公司 贵州贵阳 550000

摘要: 某批GH4169合金转子叶片, 在腐蚀检查工序时发现叶身表面存在白条纹。经试验分析, 叶身表面的白条纹是沿锻造流线分布的粗晶带。GH4169合金中 δ 相主要通过晶界的胞状反应, 在晶界及孪晶界上非均匀析出, 而 δ 相钉扎晶界会抑制晶粒长大。Nb元素偏析会引起GH4169合金 δ 相分布不均, 最终将影响其晶粒的大小及分布状态。

关键词: GH4169合金; 粗晶; δ 相; Nb偏析

1 序言

GH4169合金(相当于Inconel 718)是一种沉淀强化型Ni-Fe基高温合金, 以 γ 奥氏体为基体, BCC结构的亚稳相 γ'' 为主要强化相, 正交晶系的 δ 相为稳定相。由于其在 $-253\sim 650^\circ\text{C}$ 时具有优良的耐腐蚀、抗疲劳性能, 以及良好的塑性、焊接性能, 因此广泛用于航天转动部件^[1, 2]。某型机压气机转子叶片即为GH4169合金制造。该类叶片经腐蚀检查工

序时, 发现多批叶片叶身表面存在白条纹, 为此我们系统地研究了叶片叶身表面白条纹形成的原因, 并分析了白条纹对叶片疲劳寿命的影响。

2 检测

2.1 宏观及显微镜检查

该叶片叶身表面的白条纹均沿叶身纵向呈线性分布, 与灰褐色基体分界明显。在三维视频显微镜下将白条纹放大观察, 白条纹区域晶粒相对基体较

基金项目: 中国航发自主创新项目(ZZCX-2020-025), 面向智能制造的航空发动机零部件数字化检测技术研究-压气机叶片外观缺陷数字化检测技术研究。

3) 建议采取减小酸洗时间、增加电镀速度等措施改进电镀工艺; 批量生产时, 应做抽样检验, 电镀前进行拉伸和表面硬度检验、电镀+消氢处理后进行弯曲检验, 有效评价和控制批量产品的质量。另外, 应特别注意电镀工艺和消氢工艺的适用性, 以及对工序衔接间隔时间的控制。

参考文献:

- [1] 刘其斌, 李宾. 65Mn弹簧钢的激光焊接组织及性能[J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 105-108.
- [2] 杨建桥, 梁博. 弹簧钢表面Cr-SiC复合电镀工艺及镀层性能[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(3): 147-148.
- [3] 商红武, 安茂忠, 杨培霞. 电镀过程中氢脆的产生及其抑制措施[J]. 电镀与涂饰, 2008, 12(5): 4-7.
- [4] 郭春秋. 65Mn钢弹簧垫圈开裂原因分析[J]. 理化检验

(物理分册), 2010, 46(11): 719-722.

- [5] KITTEL J, SMANIO V, FREGONESE M, et al. Hydrogen induced cracking (HIC) testing of low alloy steel in sour environment: Impact of time of exposure on the extent of damage[J]. Corrosion Science, 2010, 52(4): 1386-1392.
- [6] BOIADJIEVA T, MIRKOVA L, KRONBERGER H, et al. Hydrogen permeation through steel electroplated with Zn or Zn-Cr coatings[J]. Electrochimica Acta, 2013, 114: 790-798.
- [7] GOMMLICH T. Atomic hydrogen from electroplating of high strength steels-how much is trapped in the coating[C]. NACE International Corrosion Conference Proceedings, 2016: 1-10.

MW 20210814

为粗大，局部呈现金属光泽，在基体位置也可见弥散分布的白点，如图1所示。

沿白亮状条纹所在平面磨制金相试样，在光学显微镜下观察，叶身基体及白条纹区域均未见夹杂物集聚、偏析特征。将试样腐蚀后观察，叶身组织呈混晶特征，白条纹区域为线性分布的粗晶聚集带，如图2所示。宏观而言，粗晶相对细晶更易被腐蚀，叶身经表面腐蚀工艺后，粗晶聚集带形成了线性浅腐蚀区，基体中弥散分布的大晶粒形成浅腐蚀白点。

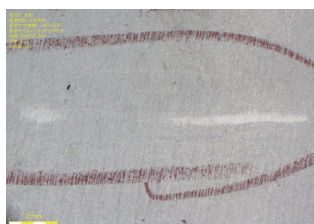


图1 试验叶片叶身白条纹宏观特征

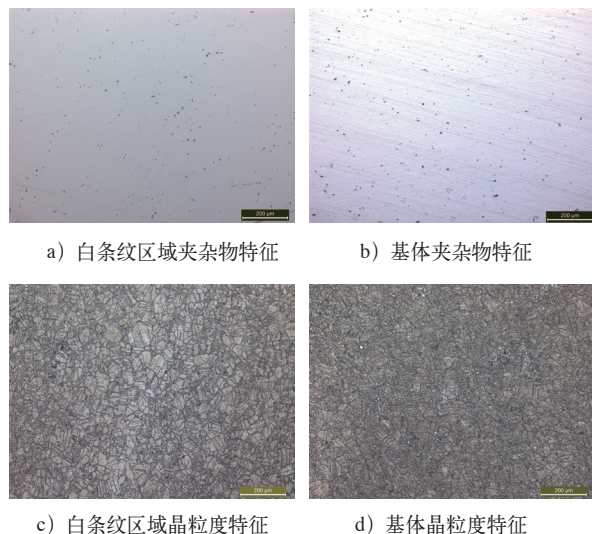


图2 叶身表面组织特征

2.2 SEM技术检测

将金相试样放置在扫描电镜（SEM）下观察，结果表明：叶片叶身 δ 相为颗粒状+短棒状，主要沿晶界析出，晶内析出极少；白条纹区域 δ 相较为稀疏，基体位置的 δ 相较为密集，如图3所示。这是由于GH4169合金中 δ 相主要通过晶界的胞状反应，在晶界和孪晶界上非均匀析出^[3, 4]。基于镍基合金细化晶粒工艺（MinigrainTM Processing），由于GH4169合金 δ 相钉扎晶界，阻碍了晶界扩展，使得晶粒生长受到阻碍，故 δ 相含量较多的区域，晶粒一般较为细小；反之，晶粒较为粗大^[5, 6]。

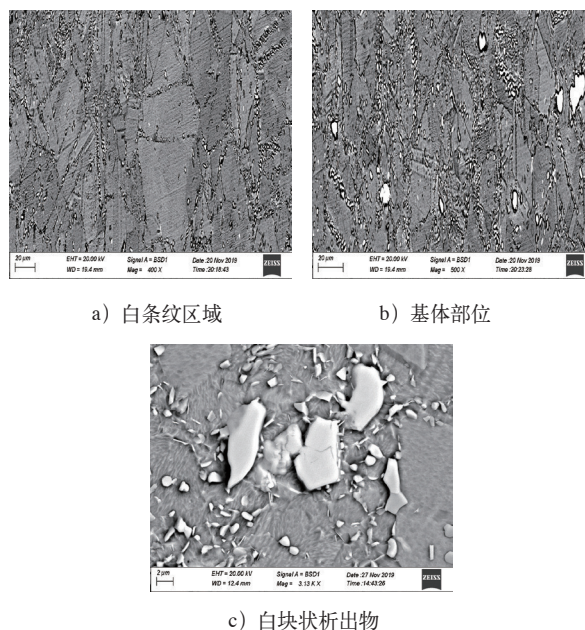


图3 试验叶片叶身电镜下 δ 相形貌特征

此外，在基体部位可观测到大量白块状析出物（见图3c），而白条纹区域则未见此类析出物。分别对基体、白条纹区域、白块状析出物做能谱分析，结果见表1。能谱分析结果表明：白条纹区域未见异常元素，但 w_{Nb} 相比基体低约15%；白块状析出物是以Nb、Ti元素为主的碳化物，其中 w_{Nb} 约为66%。试验叶片原材料来源于真空感应熔炼+电渣重熔+真空电弧炉重熔的合金锭，此类合金锭在凝固过程中总是存在树枝状偏析^[7]。对于GH4169合金，树枝间富Nb、Ti元素，枝干部位则贫Nb、Ti元素，由于这类偏析会遗传至材料成品中，形成粗细晶条带偏析、 δ 相与 γ 相的条带偏析，所以在锻造过程中，这类偏析会一直存在。

表1 试验叶片能谱分析结果（质量分数）（%）

位置	C	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
基体	—	0.57	1.07	19.09	18.40	52.18	5.71	2.98
粗晶带	—	0.65	1.08	19.40	18.86	52.13	4.96	2.92
白块	26.41	—	5.99	—	—	1.53	66.07	—

3 分析讨论

δ 相是一种正交晶系的稳定相，其分子式为 $Ni_3(Nb_{0.8}Ti_{0.2})$ ^[8]。Nb不仅是 δ 相的主要组成元素，庄景云等^[7]的研究也表明，随着Nb含量的增加， δ 相的溶解温度随之升高，如图4所示。因此，GH4169合金中Nb含量决定了 δ 相的数量。试验叶片锻造原

材料存在Nb偏析,致使锻件部分区域贫Nb,贫Nb区域 δ 相含量稀少,对晶界的钉扎作用较弱,形成了粗晶区。在锻造过程中,粗晶区域沿锻造流线分布,经腐蚀工序检查时,粗晶区域形成线性浅腐蚀区,宏观表现即为白条纹。

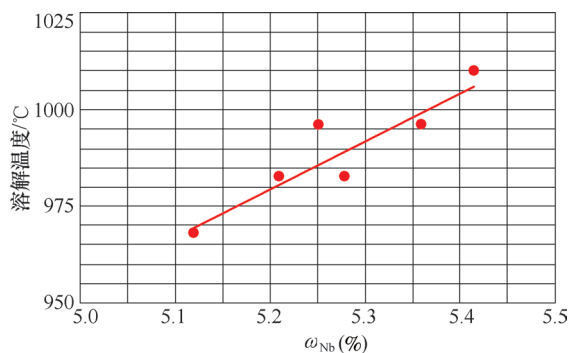


图4 Nb含量对 δ 相溶解温度的影响

GH4169合金中的主要强化相为BCC结构的亚稳相 γ'' ,其分子式为 Ni_3Nb 。 δ 相作为 γ'' 的平衡相,两者分子式相似,主要组成元素均含有Nb。由于Nb偏析,试验叶片叶身基体位置析出以Nb元素为主的碳化物及大量 δ 相,必然消耗合金中过多的Nb,导致局部 γ'' 相贫化,进而合金基体弱化,强度明显下降,为裂纹萌生和扩展提供通道^[9];白条纹区域 δ 相比较为稀少,使材料具有缺口敏感性^[7],这对于转动零件是不允许的,因为这会是零件瞬间破裂的隐患。KOBAYASHI等^[10]研究了Inconel718合金粗晶和细晶的高周疲劳性能:细晶材料中,在 10^7 周次下,疲劳强度是抗拉强度的51%,而粗晶材料在相同周次下,疲劳强度仅为抗拉强度的32%。洪班德等^[11]的研究也表明,Inconel718合金沿晶界锯齿状分布的 δ 相可提高材料对裂纹沿晶扩展的能力,而粗晶试样的疲劳寿命只有细晶的约1/3。因此,沿叶身锻造流线分布的粗晶带,在叶片高频转动的情况下会成为疲劳裂纹的萌生源,降低叶片的疲劳寿命。

4 结束语

1) 该GH4169合金叶片叶身表面的白条纹,为沿锻造流线分布的粗晶带。

2) GH4169合金Nb元素偏析会导致局部贫Nb,贫Nb区域 δ 相含量稀少,对晶界的钉扎作用较弱,形成了粗晶区。

3) GH4169合金叶片叶身存在Nb偏析,基体

析出以Nb元素为主的碳化物及大量 δ 相,导致局部 γ'' 相及 δ 相贫化,进而合金基体弱化,局部存在缺口敏感性,降低叶片疲劳寿命。

参考文献:

- [1] 付建辉,周扬,赖宇,等.固溶处理对GH4169合金晶粒长大和硬度的影响[J].金属热处理,2021,46(1):75-80.
- [2] 肖久林,田树川,苏雷,等.GH4169合金螺栓基于失效模式的制造规范研究[J].航空维修与工程,2017(6):66-68.
- [3] 张海燕,张士宏,程明,等. δ 相对GH4169合金热变形后热处理中晶粒长大的影响[J].材料热处理学报,2017,38(3):70-75.
- [4] 张京玲. δ 相对GH4169合金的组织演化和性能影响[D].天津:天津大学,2016.
- [5] 王建国,刘东,王海平,等.GH4169合金晶界 δ 相析出的动力学分析[J].稀有金属材料与工程,2019,48(4):1148-1154.
- [6] 韦家虎,董建新,喻健,等. δ 相对GH4169合金热变形行为的影响[J].航空材料学报,2012,32(6):72-77.
- [7] 庄景云,杜金辉,邓群,等.变形高温合金GH4169[M].北京:冶金工业出版社,2006.
- [8] 司家勇,刘峰. δ 相对Inconel 718合金组织与疲劳性能影响的研究进展[J].材料导报A,2013,27(4):89.
- [9] 王春光,王东哲,万红,等.锻造及热处理工艺对GH4169合金组织与性能的影响[J].锻压技术,2014,39(12):14-18.
- [10] KOBAYASHI K, YAMAGUCHI K, HAYAKAWA M, et al. High cycle fatigue properties of nickel-base alloy 718[J]. Acta Metall Sinica (English Lett), 2004, 17(4):345.
- [11] 洪班德,伊晓,孟庆昌. δ - Ni_3Nb 对Inconel718合金低周疲劳断裂行为的影响[J].金属学报,1991,27(1):55-60.

MW 20210814