K417 合金涡轮叶片焊接裂纹分析

汤浩,慕安利,刘依依,陈本,程法嵩

(中国航发贵州黎阳航空动力有限公司,贵州贵阳 550000)

摘要: 某批次涡轮叶片叶冠顶面存在焊接热影响区(HAZ)液化裂纹。利用荧光探伤,并经 解剖分析,系统地研究了该液化裂纹的特征。结果表明:裂纹内部Al、Ti元素的富集致使晶 界附近低熔点共晶的形成,从而导致液化裂纹的产生。分析了荧光探伤延迟显示的原因,提 出了降低K417合金叶片HAZ液化裂纹倾向的措施,即焊前热处理、预热及增大焊接热输入。 最后对工程应用中如何有效检测和鉴别HAZ液化裂纹进行了探讨。 关键词: K417合金;涡轮叶片;焊接热影响区;液化裂纹

镍基高温合金因其具有较高的强度及塑性,因此被广泛应用于航空发动机热端 部件的制造,特别是用于制造涡轮叶片和导向叶片^[1]。K417合金就是一种用于制备 涡轮叶片也可以用于制备导向叶片的合金^[2]。某批K417合金 I 级涡轮叶片工厂试车 后,在叶冠顶面存在荧光显示,经检查发现在堆焊层熔合线附近存在多条焊接热影 响区(HAZ)液化裂纹。该批叶片在试车前经过2次荧光探伤,叶冠面均未有荧光显 示。近年来较多的学者在镍基合金HAZ液化裂纹的形成机理和控制措施等方面做了 大量研究,张秉刚等^[3]详细阐述了HAZ液化裂纹的形成机理和控制措施等方面做了 大量研究,张秉刚等^[3]详细阐述了HAZ液膜形成的机理;任天明等^[4]指出某K417荧光 显示性质为HAZ液化裂纹,吴廷宝等^[5]对某镍基导向叶片的一部分裂纹性质判定为 磨削裂纹。HAZ液化裂纹与磨削裂纹均为热应力裂纹,形貌特征基本一致,为细小 的沿晶裂纹,现实工程应用中往往会混淆这两类裂纹。上述研究均未对HAZ液化裂 纹延迟显示的原因提出讨论,也并未对HAZ液化裂纹与磨削裂纹进行对比和区分。 本文系统地分析了某K417合金涡轮叶片叶冠顶面裂纹性质及形成机理,提出了降低 HAZ液化裂纹倾向的措施,探讨在工程应用中HAZ液化裂纹延迟显示的原因,区别 HAZ液化裂纹与磨削裂纹。

1 试验过程

1.1 裂纹特征

故障涡轮叶片叶冠面荧光显示区域为Co-Cr-W堆焊层热影响区,分布情况见图 la。在荧光显示区域,观测到多条细小的微裂纹,裂纹长度在0.2~1.0 mm。裂纹起 源于堆焊层一侧,向内深入到叶片基体中,整体走势曲折,垂直于基体与堆焊层的 焊接熔合线,平行于磨削方向,见图1b。

将裂纹打开观察,原始断口附着一层粗糙的氧化皮,说明裂纹曾经历高温氧化 过程,见图2a。观察裂纹深度方向金相试样,裂纹呈沿晶特征,局部可见渗铝层, 见图2b-c。以上观察表明,裂纹在渗铝工艺之前就已经存在。

对金相试样做EDS面扫描,裂纹内部Al、Ti元素明显高于基体,见图3。Al元素 主要来源于气相渗铝工艺,焊接重熔过程会引起Ti、Al元素在晶界偏聚。Ti与C元素 亲和力较高,会吸附大量的C元素聚集在周围。Al、Ti、C等元素是组成MC碳化物和 γ'强化相的主要成分。

作者简介: 汤 浩(1989-), 男, 工程师,从事航空发动机 零部件失效分析、残余 应力检测工作。电话: 15121340925, E-mail: 1219956683@qq.com

中图分类号:TG401 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2021) 11-1290-05

收稿日期: 2021-06-04 收到初稿, 2021-06-21 收到修订稿。

1.2 裂纹性质

通过以上试验得知,叶片叶冠处的裂纹分布在焊 接热影响区,垂直于焊缝熔合线,为沿晶裂纹。裂纹 内部可见高温氧化特征,存在AI、Ti元素偏聚现象,且 局部可见渗铝层。

分析认为,在焊接热循环峰值温度的作用下,合 金中MC型碳化物和γ'强化相趋向分解并向基体扩散, 但由于温度场剧烈变化,MC碳化物和γ'相的组成元 素扩散不充分聚集在晶界,如Al、Ti、C等元素,这些 元素会形成低熔点共晶物组成液态薄膜,造成晶界液 化。镍基合金的热膨胀系数较大,且导热率较低,在 热影响区冷却初始阶段,由于固相的导热率远大于液 相的导热率,固相首先发生体积收缩,产生热应力, 而此时晶界液相尚未凝固。根据局部应变理论,凝固 过程中产生的热应力可以通过固体传递至液膜,导致 晶界液膜产生应力集中^[6]。当熔池金属凝固收缩产生的 拉力超过液膜界面张力造成的抗力时,晶界沿液固界 面撕开,形成HAZ液化裂纹。因此,HAZ液化裂纹必 然存在高温氧化特征,且存在Al、Ti、C等元素偏聚现 象,走势沿晶界扩展(包括亚晶界)。结合叶片叶冠 进行氩弧焊后,需进行气相渗铝的情况,分析认为叶 片叶冠位置的裂纹性质为典型的HAZ液化裂纹。

2 HAZ液化裂纹控制措施

HAZ液化裂纹严重降低了K417合金叶片的高温蠕



(a)荧光显示状态
 (b)裂纹宏观形貌
 图1 荧光显示状态及裂纹宏观形貌
 Fig. 1 Fluorescence display state and macro morphology of cracks



(a) 断口附着的氧化皮



(c)裂纹内部渗铝层形貌



图3 Al、Ti元素在试样面上的分布状态 Fig. 3 Distribution of Al and Ti elements on the sample surface

变性能和疲劳性能,必须对其进行严格的控制。HAZ 裂纹的形成必须具备两个因素:焊接热循环过程,热 影响区晶界低熔点共晶体液化并形成液膜;焊后冷却 过程,熔池金属凝固收缩产生的拉力超过液膜界面张 力造成的抗力。因此,可以从降低热影响区晶界液化 敏感性及凝固收缩应力,控制HAZ液化裂纹形成的趋势。

2.1 焊前热处理及预热

K417合金中Al+Ti元素质量分数为10.1%(标准合 金成分), 晶界粗大, 焊接重熔过程MC碳化物、 γ' 相易在晶界偏聚液化,损害母材显微组织,适当的热 处理可有效提高焊接质量。GONZALEZ等^[7]的研究表 明, 球状体 γ′相、细小的块状MC型碳化物, 这两种 物相可以缓解镍基合金焊接冷却过程中应力的产生。 马亚芹等^[1]将K417合余经1 090 ℃、1 100 ℃和1 110 ℃ 阶段处理10 h后,合金共晶体偏析元素扩散进入基体 中,减少了元素的偏析程度,有效提高合金共晶体的 初熔温度,降低合金热影响区晶界液化倾向。有研究表 明^[8],HAZ液化裂纹的长度与母材硬度成正比例关系, 可通过焊前固溶处理、时效处理及冷却速率控制等措 施,阻止晶间B元素非平衡偏析及硼化物生成,有效降 低合金母材硬度。综上所述,焊前热处理可降低母材 晶界低熔点共晶体含量,缓解硼元素的偏析行为,改 变 γ '相、MC型碳化物的形态及分布,使组织均匀化, 降低母材硬度,从而降低HAZ液化裂纹的倾向。

此外,焊前预热可减缓接头冷却速度,降低熔化 区域和母材之间的温度梯度,减小热应力,从而改善 热影响区液化裂纹敏感性。Ren等^[9]的研究表明,焊前 预热减少了晶界低熔点共晶体数量及热影响区液化裂 纹平均长度。Danis等^[10]对IN738LC合金进行TIG焊接 时,通过950 ℃预热得到了无裂纹焊缝。由此可见,焊 前预热可以有效地降低HAZ液化裂纹的倾向。

2.2 增大焊接热输入

增大焊接热输入有两方面的影响:加重晶界的液 化程度,降低了晶界开裂的应力阈值;降低热影响区 温度梯度,减小热影响区受到的热应力。多位学者研 究^[8-12]表明,HAZ液化裂纹形成过程热影响区熔池金属 凝固收缩产生的拉力起主导作用,因而增大热输入减 小热应力,可缓解HAZ液化裂纹敏感性。

$$\sigma = \frac{2\gamma_{\rm sl}}{h} \tag{1}$$

式中: σ为晶界对裂纹的固有抗力; γ_{s1}为固液表面张 力; h为液膜厚度。即液膜厚度与晶界对裂纹的固有抗 力成反比例关系。增大焊接热输入,使热影响区长时 间处在峰值温度,在液膜迁移与溶质反扩散的交互作 用下,消除或显著减少晶间液膜厚度。随着液膜厚度 的减少,晶界对裂纹的固有抗力增加,抗液化裂纹能 力增强。

综上所述,合理的焊前热处理及预热工艺,增 大焊接热输入,可有效降低HAZ液化裂纹的倾向。此 外,有学者^[13-14]研究表明,添加与母材热物理性能相 匹配的中间层,可有效缓解熔池凝固收缩产生拉伸应 力,减少热影响区液化裂纹。新型焊接方式等离子弧 焊(Plasma Arc Welding, PAW)、激光束焊(Laser beam welding, LBW)、电子束焊(Electron-beam welding, EBW)代替传统焊接工艺,降低HAZ液化裂 纹倾向的研究,将会是以后的重点研究方向。

3 HAZ液化裂纹与磨削裂纹的甄别

该批叶片叶冠位置使用氩弧焊焊接耐磨层后,需 进行气相渗铝,后续经历了2次荧光探伤再进行试车。 但在试车前,均未发现HAZ液化裂纹。由于HAZ液化 裂纹开口极小,堆焊层熔合线裂纹开口宽度可能介于 实际使用荧光的极限灵敏度附近。此外,气相渗铝会 在微裂纹开口位置堆积,甚至形成一层薄膜,阻止荧 光液渗透。在后续磨削、试车过程,由于磨削应力、 振动应力、气流冲刷等外力作用下渗铝层脱落或裂 开,经荧光探伤,HAZ液化裂纹被延迟发现。在部分 微裂纹开口位置,可见两侧耦合性较好,断裂、分离 的渗铝层,见图4a。因此,建议在堆焊耐磨层后时效 一段时间,增加一道高灵敏度的荧光探伤工艺,再进 行气相渗铝,防止HAZ液化裂纹漏检。

由于HAZ液化裂纹的延迟显示,在实际工程应用 中,往往会将HAZ液化裂纹错判为磨削裂纹,误导后 续的技术归零方案。两者同为热应力裂纹,形貌特征 基本一致,均为细小的沿晶裂纹^[15]。但由于HAZ液化 裂纹与磨削裂纹形成机理不同,两者依旧存在些许的 差别。在生产过程中,为了避免磨削加工对焊接接头 的影响,往往是由焊接层向母材方向进行磨削; 磨削 裂纹是由磨削热和循环应力引起的裂纹,所以扩展 方向一般垂直于磨削方向或与磨削方向存在一定的 夹角^[16]。在以往的故障案例中,在某批同类型涡轮 叶片叶冠顶面发现大量磨削裂纹,见图4b;反观HAZ 液化裂纹,开口位置一般位于焊缝熔合线上,扩展方 向垂直于熔合线,即平行于磨削方向,如本故障批次 叶片发现的HAZ液化裂纹,见图4c。此外,磨削过程 局部瞬时温度会较高,但磨削面整体温度远低于重熔 温度,裂纹断口未被氧化或氧化程度较低;在晶界位 置,由于未重熔形成液膜,也不存在Ai、Ti、C等低熔 点共晶体组成元素偏聚。在实际工程应用中,也应结 合产品生产工艺判断。如本次故障,叶片裂纹内部发 现有渗铝层,在气相渗铝之前,并未对堆焊层与叶冠



 (a)表面裂开的渗铝层
 (b)磨削裂纹走势
 (c)HAZ液化裂纹走势

 图4 表面裂开的渗铝层形貌及HAZ液化裂纹与磨削裂纹的特征

 Fig. 4 Morphology of surface cracked aluminized layer and characteristics of HAZ liquefaction crack and grinding crack

进行磨削加工,因此可以排除磨削裂纹的可能性。综 合以上分析,可以从裂纹走势、氧化程度、晶界是否 存在低熔点共晶体偏析,以及实际工程状态区别磨削 裂纹与HAZ液化裂纹。

4 结论

(1)经过荧光、微观组织和成分分析可知,送检 K417合金涡轮叶片叶冠位置的裂纹缺陷为典型的HAZ 液化裂纹。 (2)焊前热处理及预热工艺、增大焊接热输入、添加中间层,可有效降低HAZ液化裂纹的倾向。新型焊接方式代替传统焊接工艺降低HAZ液化裂纹倾向的研究,将会是以后的重点研究方向。

(3)涡轮叶片制造过程中的气相渗铝工艺会在微裂纹开口位置堆积,甚至形成一层薄膜,阻止荧光液 渗透。建议在气相渗铝之前增加一道高灵敏度的荧光 探伤,防止HAZ液化裂纹漏检。在工程实际应用中, 应注意区别HAZ液化裂纹与磨削裂纹。

参考文献:

- [1] 马亚芹,于兴福,孙文儒,K417G合金 y + y '共晶初熔特性及影响因素研究 [J]. 铸造, 2014, 63 (2): 185-189.
- [2] 孙宝才,鲁悦,林中天,等.K417G合金铸件荧光显示问题研究[J].铸造,2018,67(10):915-917.
- [3] 张秉刚,彭飞,王厚勤,等.沉淀强化镍基高温合金熔化焊液化裂纹研究进展[J].焊接,2019(9):26-31.
- [4] 任天明,何黎明.某型航空发动机涡轮叶片再制造 [J]. 航空维修工程,2011(2):71-73.
- [5] 吴廷宝,于兴福,李波,等. 航空发动机用导向叶片叶身裂纹形成机制研究 [J]. 铸造, 2013, 62 (2): 156-163.
- [6] 席明哲,高士友.激光快速成形Rene80高温合金组织及裂纹形成机理[J].中国激光,2012,39(8):91-96.
- [7] GONZAIEZ M A, MARTINEZ D I, PEREZ A, et al. Microstructural response to heat affected zone cracking of prewelding heat-treated Inconel 939 superalloy [J]. Materials Characterization, 2011, 62: 1116–1123.
- [8] OSOBA L O, SIDHU R K, OJO O A. On preventing HAZ cracking in laser welded DS Rene 80 superalloy [J]. Materials Science and Technology, 2011, 27 (5): 897–902.
- [9] REN W J, LU F G, YANG R J. Liquation cracking in fiber laser welded joints of inconel 617 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 226: 214–220.
- [10] DANIS Y, LACOSTE E, ARVIEU C. Numerical modeling of inconel 738LC deposition welding: prediction of residual stress induced cracking [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210 (14): 2053–2061.
- [11] IDOWU O A, OJO O A, CHATURVEDI M C. Effect of heat input on heat affected zone cracking in laser welded ATI allvac 718plus superalloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 454 (16): 389–397.
- [12] MEI Y P, LIU Y C, LIU C X, et al. Effect of base metal and welding speed on fusion zone microstructure and HAZ hotcracking of electron-beam welded Inconel 718 [J]. Materials & Design, 2016, 89: 964–977.
- [13] BANEJEE K, RICHARDS N L, CHATURVEDI M C. Effect of filler alloys on heat-affected zone cracking in preweld heat-treated IN-738 LC gas-tungsten-arc welds [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36 (7): 1881–1890.
- [14] OLAOT, OJOOA, CHATURVEDIMC. Role of filler alloy composition on laser arc hybrid weldability of nickel-base IN738 superalloy [J]. Materials Science & Technology, 2014, 30 (12): 1461–1469.
- [15] 王华,孙智君,张凌峰,等.精铸K242合金定位扇形件裂纹分析及防治 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (9): 843-846.
- [16] 高铁生. 磨削裂纹产生的原因与控制 [J]. 热处理技术与装备, 2007, 28(6): 55-56.

1294 转进 FOUNDRY 试验研究

Analysis of Welding Cracks for K417 Alloy Turbine Blade

TANG Hao, MU An–li, LIU Yi–yi, CHEN Ben, CHENG Fa–song (AECC Guizhou Liyang Aviation Power Co., Ltd., Guiyang 550000, Guizhou, China)

Abstract:

There are liquefying cracks in heat affected zone (HAZ) on the top surface of a batch of turbine blades. By means of fluorescence flaw detection and section analysis, the characteristics of the liquefying crack were systematically studied. The results show that the enrichment of Al and Ti elements in the crack leads to the formation of low melting point eutectic near the grain boundary, resulting in the liquefying cracks. The reason of delayed display in the fluorescent flaw detection was analyzed. The measures to reduce the HAZ liquefying crack tendency of K417 alloy blade were put forward, including heat treatment before welding, preheating and increasing welding heat input. Finally, how to effectively detect and identify the HAZ liquefaction cracks in engineering application was discussed.

Key words:

K417 alloy; turbine blade; welding heat affected zone; liquefying crack