

钛合金铸件壳体裂纹缺陷检测和分析

张钊骞¹, 孙春贵¹, 罗晋², 于涵¹

(1. 沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022;

2. 沈阳黎明航空发动机公司, 辽宁沈阳 110000)

摘要: 钛合金铸件作为一种高强度轻合金在航空航天领域应用越来越多。某批次钛合金铸件壳体焊接组件打压后, 在电子束环焊缝热影响区产生了裂纹。通过各个阶段的无损检测和金相检测, 对裂纹进行了分析和研究, 确定了裂纹缺陷的成因。研究结果为避免钛合金壳体组件再次出现裂纹缺陷, 提出了解决方案。

关键词: 钛合金铸件; 裂纹; 缺陷检测; 缺陷分析

1 焊缝及裂纹

本试验的钛合金壳体组件是由壳体芯部毛坯铸件和壳体盖板铸件加工后采用真空电子束^[1]焊接成形, 壳体芯部毛坯叶片出口根部为小通径窄内腔道结构形式。组件结构如图1所示, 圆圈标记为真空电子束焊缝部位。壳体组件焊接区发生打压后渗漏, 目视观测发现裂纹且裂纹位置对称。焊缝和裂纹实物状态见图2和图3。为确定裂纹产生原因和避免类似问题产生, 对裂纹及邻近区域的宏观、微观及射线影像进行系统分析。

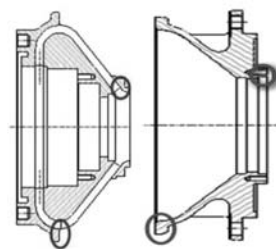


图1 壳体芯部毛坯和壳体盖板剖面示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the cross section of the shell core blank and the shell cover

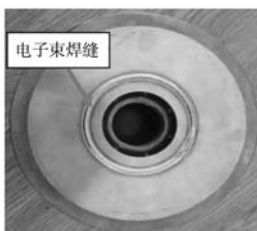


图2 铸件形貌图
Fig. 2 Casting morphology

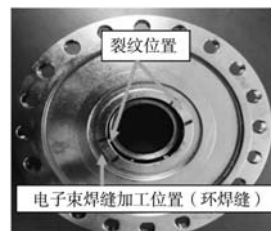


图3 裂纹缺陷位置
Fig. 3 Crack defect location

2 裂纹产生阶段分析

各种形式的微观或宏观裂纹, 如疲劳裂纹、蠕变裂纹、过载裂纹、应力腐蚀裂纹、氢致裂纹等都是在应力、环境或二者同时的作用下产生的。产生的裂纹扩展到一定程度可造成材料的断裂。

钛合金铸件受到应力产生的裂纹有以下几种情况: 铸件成形过程中冷却速度不一致产生的铸件内应力导致铸造裂纹; 焊补或焊接产生的残余应力导致焊接裂纹; 打压过程受到的外部应力产生的应力裂纹。

以下通过各个阶段的无损检测实验、报告和记录分析钛合金组件中裂纹形成阶段。

(1) 组件焊接前阶段。复查组件电子束焊接前的无损检测报告, 包括X射线底片和渗透检测记录。焊接前, 铸件内部和表面均未见超过技术条件要求的缺陷, 证明组焊前的铸件毛坯无铸造产生的裂纹缺陷。

作者简介:

张钊骞(1974-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为无损检测。电话: 024-25852311, E-mail: nihaozzq@163.com

中图分类号: TG146
文献标识码: B
文章编号: 1001-4977(2022)12-1592-04

基金项目:
中国机械科学研究总院集团有限公司定向基金(200219ZS01)。
收稿日期:
2022-06-28 收到初稿,
2022-10-18 收到修订稿。

(2) 组件焊接后阶段。复查组件毛坯加工后的电子束组焊的焊缝底片。射线检测方向是垂直方向,在电子束环焊缝及热影响区,未发现裂纹缺陷。因打压后发现裂纹开裂的方向与射线透照方向一致,表明当裂纹发生在焊接前,该方向的裂纹射线检测可有效检出,证明无直接由电子束焊接产生的焊接裂纹。

(3) 打压后的检测。发生渗漏后,进行了相同检测工艺的射线和表面渗透检测。射线检测发现了清晰的裂纹缺陷影像。通过渗透检测在环焊缝至中心区域一法兰端面又发现两处线性显示。缺陷尺寸约长3~5 mm,宽0.1 mm,深度2~3 mm,缺陷延伸方向为环壁内侧方向,且两处缺陷呈180°对称分布,缺陷性质为裂纹,缺陷编号为1#、2#,其中1#缺陷位置见图4。在组件另外一侧,也发现了两处裂纹缺陷,缺陷编号3#、4#,其中3#缺陷位置见图5,螺纹孔边缘。



图4 1#缺陷位置
Fig. 4 1# Defect location



图5 3#缺陷位置
Fig. 5 3# Defect location

(4) 裂纹缺陷出现的阶段。通过各个阶段的无损检测复查和渗漏后进行的无损检测结果分析,表明裂纹是打压这个阶段产生的。初步确认本次打压试验所形成的裂纹是过载裂纹,属于应力裂纹,裂纹区域的材料可能存在缺陷等原因降低了可承受载荷。

3 裂纹分析

通过查阅铸件生产工艺,裂纹位于铸件浇冒口位置。浇冒口区域是铸件性能相对较差的区域,是铸造缺陷产生的多发区。此区域易产生缩松、缩孔、气孔和夹杂等铸造缺陷降低力学性能。同时,即使排除铸造缺陷的影响,由于受铸造工艺影响,此区域的力学性能较其他区域差。

为了找出铸件裂纹产生的原因,对壳体组件进行了包括宏观和微观的多项检测。宏观检测是对组件进行无损检测;微观检测是对铸件进行失效分析取样,利用线切割方式将1#、3#缺陷位置进行切割取样,并对取样进行了CT扫描检测,取样后铸件状态如图6所示。

3.1 裂纹源分析

对裂纹缺陷断口形貌进行分析,在1#裂纹处取样进

行断口及金相检测。取样后1#裂纹形貌如图7所示,将取样后1#裂纹样品打断后断口宏观形貌如图8箭头所示为裂纹位置。裂纹区断口晶粒粗大,颜色较深,裂纹源位于外表面。

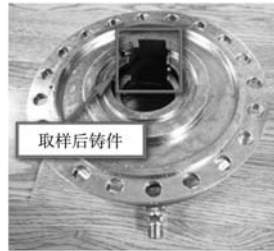


图6 取样后铸件
Fig. 6 Casting after sampling

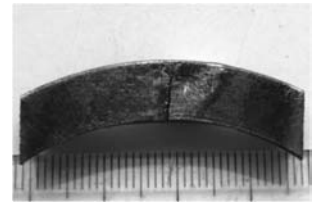


图7 1#裂纹的宏观形貌
Fig. 7 Macroscopic appearance of 1# crack

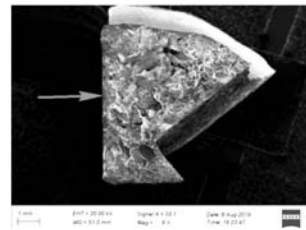


图8 裂纹断口宏观形貌
Fig. 8 Macroscopic appearance of crack fracture

3.2 宏观分析

根据裂纹产生处宏观形貌,铸件表面存在其他焊接氧化点,表明铸件此处存在焊补,经复查过程记录证实。此处出现深蓝色或黄褐色表明是严重氧化颜色^[2]。因钛合金铸件焊补部位正常表面应为银白色、金黄色或淡蓝色,因此判断为焊补过程中气体保护不当,过度氧化。

3.3 微观分析

通过断口金相分析,裂纹附近组织如图9所示。裂纹位于焊缝区及热影响区域内,附近区域金相组织为 α 。断口扫描电镜形貌如图10所示,断裂源位于裂纹外表面,断裂源区有氧化物夹杂存在,氧化物尺寸约为 $98 \mu\text{m} \times 59 \mu\text{m}$,如图11所示。氧化物尺寸小于射线

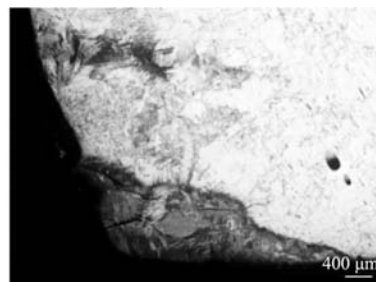


图9 断口形貌图
Fig. 9 Fracture morphology

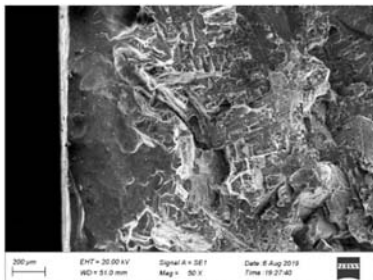


图10 扫描电镜形貌图

Fig. 10 Scanning electron microscope morphology

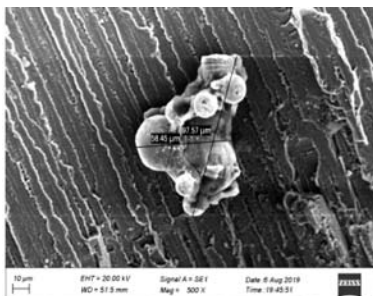


图11 氧化物形貌

Fig. 11 Oxide morphology

检测的可发现最小尺寸，所以射线检测无法发现。氧化物能谱检测结果定性分析氧化物含氧量比扩展区高16.6%。在焊补过程出现氧化现象和氧化物夹杂物的情况说明存在焊接工艺问题。

3.4 焊补分析

经查阅生产记录，由于铸件浇冒口根部留量过

少，此区域在铸造时产生了缩孔类缺陷，先通过热等静压进行消除。由于内部缺陷与外界连通，导致热等静压后缺陷无法压合，因热等静压未有效消除，所以进行了焊补来消除缺陷。虽然经过焊补消除了缺陷，但在打压过程中仍在此处产生了裂纹，说明铸造工艺上针对浇冒口根部预留尺寸存在问题并在焊补控制中存在问题。

3.5 CT扫描

对样品进行CT扫描检测，图像中可清晰地发现裂纹，裂纹的位置、大小和形状见图12。

4 问题复现

为更加准确分析缺陷成因，使用相同批次浇注的另一个未加工的毛坯铸件进行问题复现。目的是通过生产实际过程的复现，确认裂纹出现在此区域的原因。首先对毛坯铸件进行了整体的CT三维检测，发现存在缩孔缺陷（图13），并确认了缺陷在铸件浇冒口位置，此位置与打压后出现裂纹问题的铸件位置相同。在毛坯铸件同样位置进行实际挖补复现消除此缺陷（相同焊补位置、相同的焊补部位尺寸），采用了原焊补工艺复现了焊补过程，焊补过程中发现由于气体保护不当，出现了可直接观测到的表面氧化现象（类似图7）。以上过程的复现，最终确认浇冒口位置存在缩孔缺陷，在焊补修复过程中由于工艺不良导致此区域力学性能降低，是裂纹在此区域出现的主要原因。

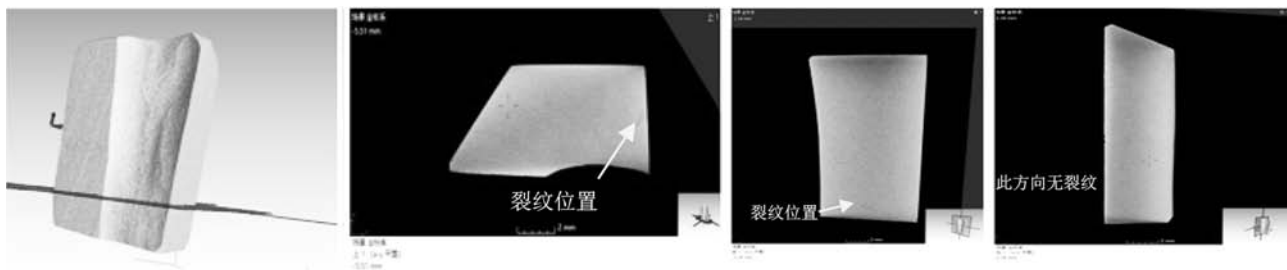


图12 裂纹3D图

Fig. 12 3D image of crack

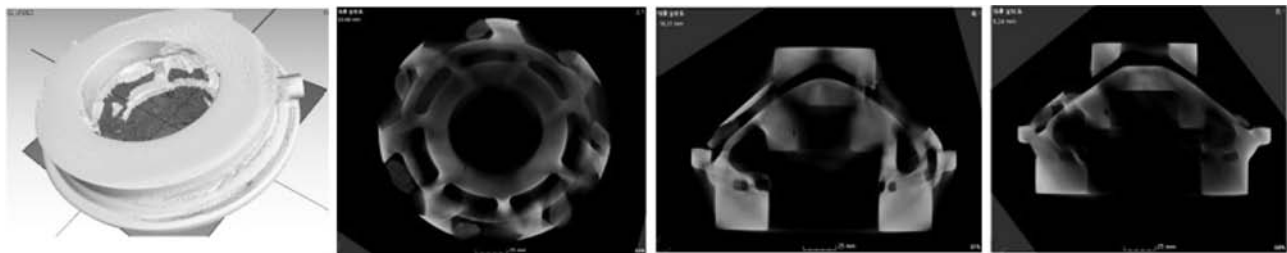


图13 缺陷3D图

Fig.13 3D map of defects

5 裂纹形成过程和结论

铸件中裂纹形成过程是壳体铸件铸造时存在收缩类缺陷,由于冒口根部留量过少,致使内部缺陷与外界连通,导致热等静压后缺陷无法压合,使此区域本体的力学性能较低。为消除铸造缺陷,进行了焊补。因焊接工艺执行存在问题和结构原因,在焊补过程中未对小口径窄流道部位进行有效的气体保护导致该铸件焊接部位氧化,同时在焊补区域内存在氧化现象和氧化物夹杂缺陷,导致局部材料的力学性能下降。铸件加工后,此处刚好又位于螺纹处位置,在最终的打压试验中,受较大应力作用时,首先在其微小的氧化物夹杂缺陷处萌生裂纹源,并沿焊缝及热影响区域扩展,形成宏观裂纹。受其影响,当一侧螺纹发生开裂后致使对面螺纹处承受更大外力引起开裂,导致裂纹形成对称分布。

铸件中裂纹形成的结论:发生裂纹的区域为浇冒口,力学性能较本体其他位置低;缺陷消除时焊补不当产生氧化和夹杂物,引起性能再次下降;加工螺纹孔减小了厚度更进一步降低了材料局部强度,因此在超过使用压力的打压试验中发生了开裂,属于应力裂纹。

6 裂纹缺陷解决方案

明确了裂纹缺陷产生的过程和原因,为避免再次发生类似情况,提出以下解决方案。

(1) 铸造方面:完善壳体毛坯的工艺指令卡,规定浇冒口根部残留量,确保缺陷可通过热等静压工艺有效去除。减少需进行焊补缺陷的产生,应尽可能不在此区域进行焊补,从根本上解决裂纹出现。

(2) 焊接方面:由于材料、工艺等多方面原因,钛合金铸件通过焊补去除缺陷时需严格控制焊补工艺。壳体组件的焊补工艺应优化焊补过程中气体保护的方法,采用真空氩气焊箱内焊补操作,或设计制作封闭腔气体保护工艺装备,杜绝焊补过程中对小口径窄腔道部位气体保护措施不当的问题。

(3) 表面检测:焊接或焊补位置应进行目视检测和渗透检测,对于小口径窄腔道部位焊后应使用反射镜或高分辨率内窥镜进行。检测是否出现表面氧化和焊接裂纹是否出现。

(4) 内部检测:优化铸件内部质量射线检测工艺,在原有的垂直透照工艺布片分布图的基础上,增加对小法兰端面 and 螺纹端面进行多角度透照检测,加强内部缺陷和其他方向出现的裂纹缺陷的检测。按照叶片数量均布,增加透照方向,每张照片相互搭接保证无漏检情况,保证铸件打压前该部位无裂纹和其他超标缺陷。

(5) CT检测:可增加采用CT扫描进行再次检测。和普通射线检测裂纹类缺陷相比,CT检测影像更直观;避免普通射线检测裂纹的检出受裂纹方向和单一的射线透照角度的影响。

参考文献:

- [1] 胡绳荪. 焊接制造导论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [2] 于启湛. 钛及其合金的焊接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.

Detection and Analysis of Crack Defects in Titanium Alloy Casting Shells

ZHANG Zhao-qian¹, SUN Chun-gui¹, LUO Jin², YU Han¹

(1. State Key Lab of Light Alloy Foundry Technology for High-End Equipment, Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Aecc Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110000, Liaoning, China)

Abstract:

As a kind of high strength light alloy, titanium alloy-casting is used more and more in the field of aeronautics and astronautics. However, after a batch of titanium alloy castings shell welding components were pressed, cracks were found in the heat affected zone of the electron beam girth weld. Through non-destructive testing and metallographic inspection at various stages, the causes of the cracks are defined by analyzing and studying. A method is proposed to solve the problem that the re-occurrence of crack defects in titanium alloy shell components.

Key words: titanium alloy castings; cracks; detection; analysis