

钛合金铸件基体火焰烧伤对荧光渗透检测的影响

杨硕^{1,2,3}, 王本志^{1,2,3}, 张军威^{1,2,3}, 张国旺^{1,3}, 杨阔^{1,3}

- (1. 北京百慕航材高科技股份有限公司, 特检中心, 北京 100094;
2. 中国航发北京航空材料研究院, 铸钛中心, 北京 100095;
3. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心, 北京 100095)

摘要: **目的** 为钛合金铸件生产过程后续相应工艺改进提供技术支持。**方法** 分析浇冒口附近反复出现裂纹的原因,对 ZTC4 和 ZTA15 两种合金产品进行生产跟踪、工艺试验安排以及切片金相微观组织分析。**结果** 火焰切割浇冒口后铸件表面出现荧光微裂纹,且目视可见,后期热等静压(HIP)工序铸件表面裂纹依然存在,而且并没有衍生新的裂纹。焊接处理,表面裂纹扩大化,并且呈环形分布。得出铸件基体裂纹产生原因:火焰切割浇冒口使铸件基体烧伤产生裂纹,烧伤部位表面产生富氧 α 层,导致零件焊接性能差,产生表面开裂。**结论** 后期通过对产生烧伤裂纹铸件,保证将富氧 α 层完全去除方式,提高焊接质量,使铸件表面质量满足要求。

关键词: 钛合金铸件; 荧光渗透检测; 火焰切割; 富氧 α 层

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.03.015

中图分类号: TG292 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)03-0082-05

Effects of Flame Burn of Titanium Alloy Castings on Fluorescent Penetrant Inspection

YANG Shuo^{1,2,3}, WANG Ben-zhi^{1,2,3}, ZHANG Jun-wei^{1,2,3}, ZHANG Guo-wang^{1,3}, YANG Kuo^{1,3}

- (1. Baimtec Material Co., Ltd., Special Inspection Center, Beijing 100094, China;
2. Titanium Casting Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;
3. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: This paper aims to provide technical support for subsequent corresponding process improvement in production of titanium alloy castings. The causes of repeat cracks near casting head were analyzed. Production tracking, process test arrangement and metallographic microstructure analysis were carried on alloy product ZTC4 and ZTA15. The results show that fluorescent micro crack appeared on the surface of the casting after flame cutting and the surface crack still existed in the later HIP process; and no new crack was derived. The surface crack was enlarged and distributed in a ring shape after welding treatment. The crack of casting matrix was caused by flame cutting riser, and oxygen-enriched α layer was produced on the surface of the burned part, which lead to poor welding performance and surface crack. In the later stage, the oxygen-enriched α layer can be removed by burning crack of the casting, to improve the welding quality and make the surface quality of casting meet requirement.

KEY WORDS: titanium alloy casting; FPI; flame cutting; oxygen-enriched α layer

钛合金是一种具有无磁性、耐热腐蚀、比强度高、抗低温脆性好、稳定性好等特点的优良结构材料^[1-2],广泛应用于航空、航天领域。钛及钛合金熔模精密铸件,形状可任意复杂,整体成形工艺可无余量甚至近

无余量,尺寸设计下限到毫米级,具有其独特的铸造优越性^[3-4]。

荧光渗透检测是检验非疏松性金属和非金属材料表面开口缺陷的方法,其采用毛细作用原理(润湿

收稿日期: 2018-04-19

作者简介: 杨硕(1991—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为渗透检测和射线检测。

的液体在毛细管中呈凹面并且上升,不润湿的液体在毛细管中呈凸面并且下降的现象)^[5-7],经过渗透、去除、显像等工序,将缺陷中的渗透液反渗到工件表面,在黑光灯下形成黄绿色缺陷显示。荧光渗透检测对零件表面宽度深度较小且内壁较粗糙的缺陷较敏感,对缺陷开口宽度检测灵敏度可达到微米级^[8-9]。

生产中常常遇到批次性铸件同一位置表面裂纹反复出现的问题,导致荧光渗透检测、清除缺陷、精整补焊、等工序返工、影响产品质量、耽误生产进度。翻查焊接记录,此区域基本都发生补焊,焊接性较差。观察发现,裂纹反复出现位置多在浇冒口附近,该铸件采用火焰切割方式去除浇冒口。初步分析原因,为节省冒口残根去除工序安排,接近无余量切除,导致火焰切割烧到基体表面,生成不规则表面微裂纹,较高温度下铸件表面产生富氧 α 层,富氧 α 层硬度高、塑性低,使钛合金在继续变形或受力时导致表面开裂^[10-12]。为进一步验证猜想,改进工艺,针对生产现场易出现问题的两种合金产品,进行生产跟踪,工艺试验安排及分析。

1 工艺试验安排

铸件生产从熔炼浇铸到终检入库工序冗杂,荧光渗透检测前主要工序流程:熔炼浇铸—清壳—切割浇冒—吹砂—酸腐蚀—热等静压(HIP)—吹砂—酸腐蚀—焊接—吹砂—酸腐蚀—荧光。分析荧光渗透检测前能够造成表面裂纹的可能工序“切割浇冒”造成冒口边缘火焰烧伤;“热等静压(HIP)”高温作用产生热裂纹。现安排试验如下:① 切割浇冒—吹砂—酸腐蚀—荧光渗透检测,在热等静压(HIP)前安排荧光渗透检测,记录切割完浇冒口铸件表面状态;② 热等静压—吹砂—酸腐蚀—荧光渗透检测,在热等静压(HIP)后,焊接之前安排荧光渗透检测,记录热等静压(HIP)后表面状态;③ 焊接—吹砂—酸腐蚀—荧光渗透检测,在清除表面裂纹,焊接之后安排荧光渗透检测,记录焊接区域及热影响区表面状态。

采用HM-604高灵敏度荧光渗透液对铸件进行荧光渗透检测,渗透20 min,预清洗采用Daraclean282清洗剂,清洗时间5 min,烘干15 min,选用D-90G干粉显像,显像时间20 min。对以上3次荧光渗透检测表面状态做记录,并做金相微观组织观察,汇总试验数据比对分析。

2 试验结果

2.1 切割浇冒口铸件表面状态

由于铸件表面不允许有打磨后银白金属色、磨痕、氧化色等,因此对铸件做吹砂处理,荧光渗透检

测前通常安排酸腐蚀,酸洗表面更利于荧光渗透检测。黑、白光下表面状态,见下图1和图2。可以看出,铸件经火焰切割去除浇冒口,荧光渗透检测发现,冒口附近规则性出现表面微裂纹,且目视可见。

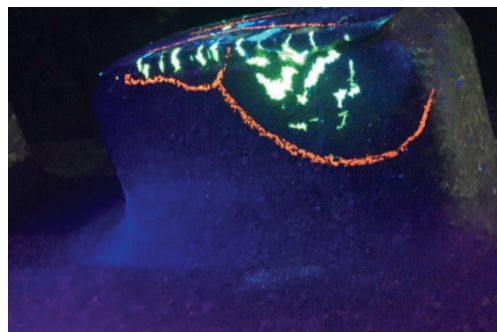


a 黑光下表面裂纹



b 白光下表面裂纹

图1 ZTC4某铸件切割浇冒
Fig.1 Cutting riser of a ZTC4 casting



a 黑光下表面裂纹

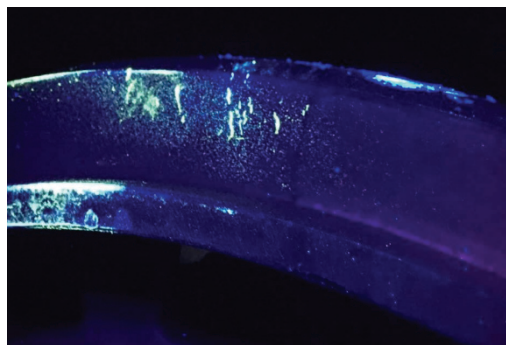


b 白光下表面裂纹

图2 ZTA15某铸件切割浇冒
Fig.2 Cutting riser of a ZTA15 casting

2.2 热等静压(HIP)后铸件表面状态

热等静压(HIP)技术对于钛合金铸件内部缩孔排除、提高致密度、降低孔隙度应用广泛^[13]。采用高温高压方式,温度为800~1000℃,压力为100~180 MPa,保温2~4 h,见图3。因上一步试验切割浇冒工序的表面裂纹未处理,热等静压后铸件表面裂纹依然存在,观察可以发现,热等静压前后铸件表面裂纹的形貌、尺寸基本一致,而且并没有衍生新的裂纹。



a ZTC4 某铸件



b ZTA15 某铸件

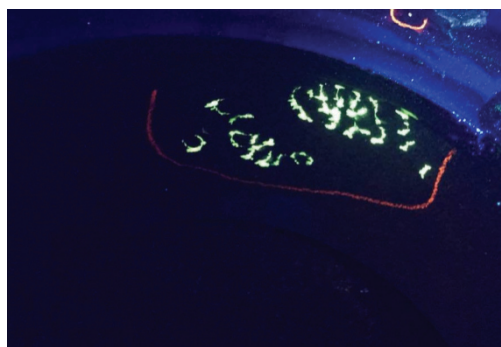
图3 热等静压后铸件表面状态
Fig.3 Surface states after HIP

2.3 清缺补焊后铸件表面状态

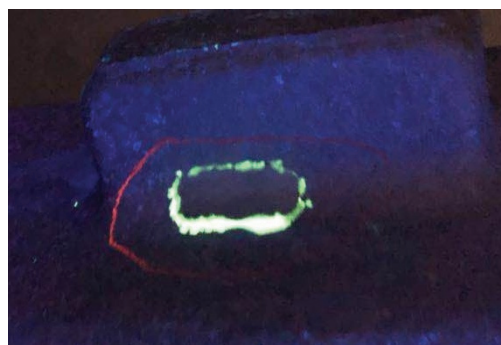
对以上裂纹进行缺陷清除、焊前处理、焊接、铸件返回吹砂、轻酸洗、荧光渗透检测,表面状态见下图4,并对冒口附近铸件基体做切片金相微观组织观察,见图5和图6。清除缺陷,焊接,表面裂纹扩大化,并且裂纹沿焊点周围呈环形分布。对冒口边缘焊接区做显微观察,测量得出,烧伤区富氧 α 层可达到1208 μm 纵深。

3 结果分析

由图1和图2可知,火焰切割去除浇冒口,冒口边缘呈片状裂纹分布,裂纹粗细不均且呈曲折的不规则曲线,冒口棱角裂纹呈锯齿状分布,从缺陷形貌可以判断,并非铸造前期带来的结构裂纹,可见火焰烧伤对铸件基体表面质量破坏严重。由图3热等静压

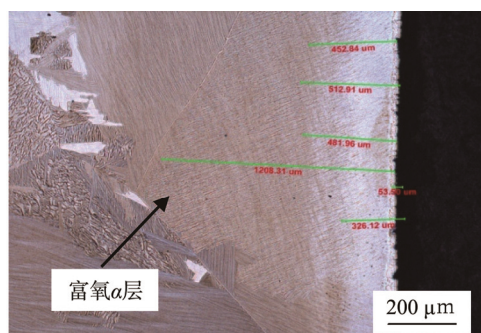


a ZTC4 某铸件

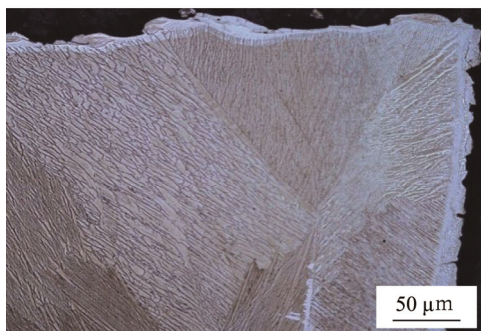


b ZTA15 某铸件

图4 清缺补焊后
Fig.4 State after welding repair



a $\times 50$



b $\times 200$

图5 ZTC4 某铸件富氧 α 层显微组织
Fig.5 Microstructure of oxygen-enriched α layer for ZTC4 casting

(HIP)后未衍生新的表面裂纹可知,热等静压(HIP)不会产生表面裂纹,从而验证了铸件表面冒口附近微裂纹由于火焰切割浇冒口所致。

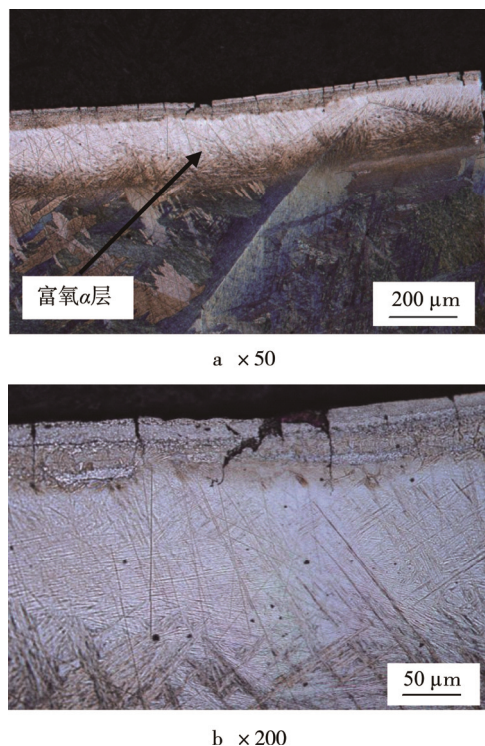
图6 ZTA15 某铸件富氧 α 层显微组织

Fig.6 Microstructure of oxygen-enriched alpha for ZTA15 casting

目前,生产现场安排的酸腐蚀工序,依据产品不同工序状态分为较大去除量的深酸腐蚀,去除量100~500 μm ,以及较小去除量的轻微酸腐蚀,去除量为5~25 μm 。观察烧伤铸件表面显微深度得出,酸腐蚀不足以去除因烧伤造成的铸件表面富氧 α 层。

分析原因,火焰切割浇冒口,当铸件表面温度达到一定范围时,氧、碳、氮等元素会扩散渗入铸件表面,从而产生由于 α 稳定剂引起的污染,表面形成富集氧、碳、氮硬而脆的污染层^[14-15]。富氧 α 层可使钛及钛合金铸件在继续变形或受力时导致表面开裂、塑性降低^[10-12],铸件还未进行退火处理,残余应力过大,火焰切割局部高温,增加了相变应力,应力集中裂纹便容易产生^[9]。对铸件表面裂纹缺陷进行打磨消除,在表面处理不到位情况下,即未完全去除富氧 α 层进行焊接,极易导致表面开裂,因此,进行荧光渗透检测时,形成焊接区环形补焊裂纹。

4 结论

1) ZTC4 以及 ZTA15 两种牌号钛合金铸件,火焰烧伤均产生不同程度裂纹,裂纹的生成与铸件的成分无关。

2) 火焰切割浇冒口产生表面裂纹,同时生成一定厚度富氧 α 层,酸腐蚀不足以去除烧伤造成的 α 层,同时烧伤部位为后期补焊、荧光渗透检测造成不必要反复。

3) 对于发生烧伤裂纹的铸件,建议扩大清除缺陷面积,提高清除缺陷深度,保证将富氧 α 层完全去除,提高焊接质量。

4) 在清除表面荧光缺陷之后,可安排二次荧光渗透检测复验,避免表面缺陷处理不彻底造成的焊接裂纹。

参考文献:

- [1] 莫晓飞, 南海, 王辉, 等. 高温铸造钛合金 ZTA29 工艺性能研究[J]. 铸造, 2015, 64(7): 664—668.
MO Xiao-fei, NAN Hai, WANG Hui, et al. Study on Properties of ZTA29 High Temperature Titanium Casting Alloy[J]. Foundry, 2015, 64(7): 664—668.
- [2] 郅喜望, 殷亚军, 吴国清, 等. ZTC4 钛合金大型复杂铸件组织及性能均匀性[J]. 精密成形工程, 2017, 9(4): 85—89.
QIE Xi-wang, YIN Ya-jun, WU Guo-qing, et al. Homogeneities of Microstructure and Mechanical Properties of Large Complex Castings of ZTC4 Titanium Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(4): 85—89.
- [3] 樊振中, 徐秀丽, 王玉灵, 等. 熔模精密铸造技术在航空工业的应用和发展[J]. 精密铸造, 2014, 34(3): 285—289.
FAN Zhen-zhong, XU Xiu-li, WANG Yu-ling, et al. Investment Casting Technology Application and Development in the Aviation Industry[J]. Precision Casting, 2014, 34(3): 285—289.
- [4] 赵永庆, 葛鹏. 我国自主研发钛合金现状与进展[J]. 航空材料学报, 2014(4): 51—61.
ZHAO Yong-qing, GE Peng. Current Situation and Development of New Titanium Alloys Invented in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014(4): 51—61.
- [5] 林猷文, 任学东. 渗透检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
LIN You-wen, REN Xue-dong. Penetrant Inspection[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004.
- [6] E1417/E1417M-13, Standard Practice for Liquid Penetrant Testing[S].
- [7] E165/E165M-12, Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry[S].
- [8] 陈振亚, 沈兴全, 杨承昌, 等. TI-6AL-4V 裂纹缺陷荧光渗透检测研究[J]. 工艺与检测, 2015(6): 117—120.
CHEN Zhen-ya, SHEN Xing-quan, YANG Cheng-chang, et al. TI-6AL-4V Crack Defects Fluorescent Penetrant Testing Research[J]. Technology and Test, 2015(6): 117—120.
- [9] 聂小武. 荧光渗透检出的铸件缺陷成因分析及防止措

- 施[J]. 无损检测, 2005, 27(8): 443—445.
- NIE Xiao-wu. The Cause of the Defects in Casting Detected by Fluorescent Penetrant Technique and Their Prevention[J]. Nondestructive Inspection, 2005, 27(8): 443—445.
- [10] 侯丽华, 吴睿. 常规热处理对 TC4 合金富氧 α 层及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 39(3): 65—68.
- HOU Li-hua, WU Rui. Effects of Conventional Heat Treatment on Oxygen-rich α Layer and Mechanical Properties of TC4 Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 39(3): 65—68.
- [11] 朱志寿, 王新南, 吴崇周, 等. 钛合金富氧 α 层的形成与测定方法研究[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(12): 24—28.
- ZHU Zhi-shou, WANG Xin-nan, WU Chong-zhou, et al. Study on Formation and Detection of Rich-Oxygen α Layer in Titanium Alloy[J]. Rare Metals Letters, 2007, 26(12): 24—28.
- [12] DONG Y W, BU K U N. Determination of Interfacial Heat-Transfer Coefficient During Investment-casting Process of Single-crystal Blades[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 2123—2131.
- [13] 徐健. 基于热等静压技术的航空类铸造零件研究[J]. 科技创新导报, 2013(34): 39—40.
- XU Jian. Airline Casting Parts Hot Isostatic Pressing Pressing Technology Research Based[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(34): 39—40.
- [14] 秦建峰. 热氧化 TC4 的制备及其力学性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- QIN Jian-feng. Mechanical Properties Characterization of Thermal Oxidation TC4[D]. Taiyuan: Taiyuan Science and Engineering University, 2016.
- [15] 赵爱玲, 王大月, 王燕, 等. 钛及钛合金热氧化行为研究[J]. 钛工业进展, 2013, 30(1): 16—19.
- ZHAO Ai-ling, WANG Da-yue, WANG Yan, et al. The Comparison of Thermal Oxidation Kinetics for Pure Titanium and Titanium Alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2013, 30(1): 16—19.