

ZTA15 钛合金小型复杂厚壁类铸件的缩孔分析及工艺改进

孙冰^{1,2} 王易山^{1,2} 孙宏喆^{1,2} 乔海滨^{1,2} 李渤渤^{1,2} 王非^{1,2}
(1.洛阳双瑞精铸钛业有限公司; 2.中国船舶集团有限公司第七二五研究所)

摘要 介绍 ZTA15 钛合金航空用小型厚壁类铸件的结构特点及铸造工艺,分析了原工艺铸件热节及缩孔缺陷的特征及形成原因。采取了两种改进措施,一是立式增加厚区补缩浇道的阶梯式浇注,二是采用了卧式底注联合排气冒口工艺。通过生产实践验证,采用卧式底注联合排气冒口工艺,通过增加法兰内浇道数量,缩短内浇道补缩距离,减小冒口颈截面尺寸,加长冒口长度尺寸等措施,消除了铸件缩孔、缩松缺陷,使 X 探伤检测的一次合格率提高至 100%。

关键词 ZTA15 钛合金;小型厚壁类铸件;热节;缩孔

中图分类号 TG146.23;TG249.5

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Shrinkage Cavity Analysis and Process Optimization of Small and Complex Thick-wall ZTA15 Titanium Alloy Castings

Sun Bing^{1,2}, Wang Yishan^{1,2}, Sun Hongzhe^{1,2}, Qiao Haibin^{1,2}, Li Bobo^{1,2}, Wang Fei^{1,2}

(1.Luoyang Shuangrui Precision Casting Titanium Co., Ltd.; 2.Luoyang Ship Material Research Institute)

Abstract: The structural characteristics and casting process of small and thick-wall ZTA15 alloy castings for aviation were introduced, and the characteristics and origination of hot spot and shrinkage defects in the original process castings were analyzed. Optimization measures were taken by utilizing step gating system vertically adding feeding sprue in thick zone, and the horizontal bottom gating system combined with exhaust riser. The practical production verifies that in the latter, the casting shrinkage cavity(porosity) are eliminated by increasing the number of flange inner runners, shortening the feeding distance of the inner runner, reducing the cross-sectional size of riser neck and extending the length of the riser, thus increasing the one-time pass rate of X-ray detection to 100%.

Key Words: ZTA15 Titanium Alloy, Small and Thick-wall Castings, Hot Spot, Shrinkage Holes

ZTA15 钛合金由于其较高的强度、良好的热稳定性和焊接性能,广泛用于生产航空大型结构件及多种军工配套铸件。但由于钛合金高的化学活性及结晶特点,在铸造时容易产生缩孔缺陷,降低了铸件壁厚的有效截面,对铸件强度、刚度、韧性等力学性能指标以及抗冲击能力等有着直接影响^[1~6]。本课题针对安装座批量生产中出现的缩孔,分析了其形成原因,制定了改善对策,并通过实际生产进行了验证,最终消除了缩孔缺陷,并根据改善经历提出了一些改进的设计思路及方法。

1 铸件结构分析

航空用某型号 ZTA15 钛合金铸件局部结构见图 1,是航空发动机关键连接件之一,其内部品质要求较

高,需进行 100% 的 X 光检测,且加工后表面不允许有任何裂纹、缩孔等缺陷。该铸件几何尺寸较小,壁厚较厚,局部壁厚相差大,存在热节部位,极易产生缩孔、缩松等缺陷,影响铸件成品率。

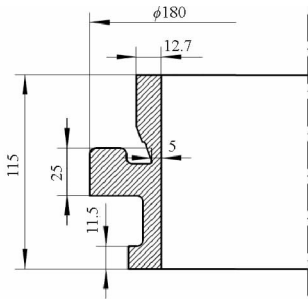


图 1 安装座截面局部

Fig.1 Partial section of mounting base

收稿日期:2022-04-12;修改稿收到日期:2022-05-13

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB2008300,2020YFB2008301)

第一作者简介:孙冰,女,1988 年出生,工程师,河南洛阳(471000),E-mail:ice211sun@163.com

引用格式:孙冰,王易山,孙宏喆,等. ZTA15 钛合金小型复杂厚壁类铸件的缩孔分析及工艺改进[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):102-105.

SUN B, WANG Y S, SUN H Z, et al. Shrinkage cavity analysis and process optimization of small and complex thick-wall ZTA15 titanium alloy castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1):102-105.

航空安装座是具有对称结构的法兰连接的环形件，主要由中间呈阶梯过渡的上下圆环、法兰、实心的方形凸台等结构组成。铸件单件质量为 2 kg，最大轮廓尺寸为 $\phi 180\text{ mm}\times 115\text{ mm}$ ，铸件存在 3 处壁厚较大的结构，并且都与薄壁相连，最小壁厚为 5 mm，短距离壁厚

变化至 25 mm。
安装座材质为 ZTA15 钛合金，名义成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V，属于近 α 型钛合金，具体成分见表 1，力学性能见表 2。铸件尺寸公差要求达到 GB/T6414-2017 中的 CT7 级，内部品质要求符合 GJB2896A-2007

表 1 ZTA15 钛合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZTA15 Ti alloy											%
w_B											
Al	V	Mo	Zr	Fe	Si	C	N	H	O	其他	Ti
5.5~6.8	0.8~2.5	0.5~2.0	1.5~2.5	≤ 0.30	≤ 0.15	≤ 0.13	≤ 0.05	≤ 0.01	≤ 0.16	单个 总和	余量
										≤ 0.1 ≤ 0.3	

表 2 热等静压+退火处理后铸件力学性能

Tab.2 Mechanical properties of the casting after HIP and annealling treatment			
抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
≥ 885	≥ 785	≥ 5	≥ 12

II 类 B 级。

2 初始工艺方案

安装座上下圆环及法兰根部壁厚过渡大，两处凸耳对称分布在基体两侧，热节点多且分散，最初的设计方案主要依靠主体圆环来补缩热节部位，在铸件底部设置两个内浇道，在上部厚壁部位设计两个对称冒口，见图 2。根据顺序凝固冒口补缩原则，采用热节圆比例法计算冒口尺寸，顶部热节圆直径为 13.8 mm，冒口颈尺寸为 $\phi 10\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ，冒口尺寸为 $\phi 20\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 。但发现冒口切割后从冒口颈根部延伸至铸件内部出现缩孔，同时通过 X 光探伤结果显示法兰盘两侧凸耳处均有缩孔，其分布及特征见图 3 和图 4。这是由于钛液经过冒口根部与铸件接触的部分形成接触热节与流动热节，造成局部过热，从而导致冒口颈部凝固时间比铸件其他部位凝固时间长，成为铸件与冒口最后凝固的部位，自身得不到补缩，产生缺陷。同时铸件法兰外侧凸耳部位厚度为 25 mm，相邻的法兰盘根部拐角区域厚度只有 5 mm，壁厚不均匀导致凸耳厚区形成了独立的热节点，连接凸耳厚区的法兰盘根部拐角部位壁薄最先凝固，冒口及主体圆环对凸台厚区补缩通道不畅通，难以进行有效地填充，这是凸台处出现缩孔的根本原因。

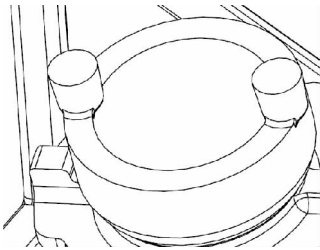
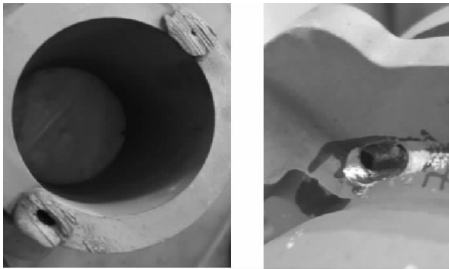


图 2 原立式底注双冒口方案

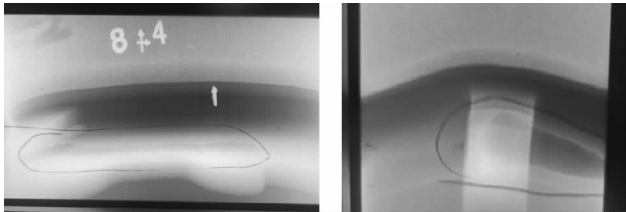
Fig.2 Initial scheme of vertical bottom injection double riser



(a) 冒口缩孔 (b) 局部

图 3 安装座缩孔位置及其特征

Fig.3 Location and characteristics of shrinkage cavity in the mounting base



(a) 沿法兰盘与圆环相交处 (b) 凸耳附近

图 4 原工艺铸件内部 X 光探伤显像

Fig.4 X-ray flaw detection images inside casting in the initial process

3 改进方案 1

改进方案 1 见图 5，在原工艺的基础上，将冒口体积增至原来的 2.5 倍，具体尺寸为 $\phi 25\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ ，采用阶梯式浇注系统，在两个厚大的侧耳底部设置底注补缩浇道。补缩浇道与主浇道相连，对法兰外侧凸耳进行单独的补缩，尺寸为 $\phi 15\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ 。结果表明，顶冒口尺寸增大，但冒口颈根部的缩孔依旧会在冒口下形成，见图 6。原因是钛合金密度小，增大冒口尺寸后在真空下凝固时钛液压力也比较小，不足以有效补缩，并且随着冒口体积增大，冒口与铸件相连接部分的热节也随之增大，铸件原有热节处的散热条件更加恶化，凝固时间延长，需要补缩的体积增大，而热节部位在凝固过程中得不到补缩，因而产生缩孔。此外，通过 X 光探伤发现凸耳厚区的缩孔通过内浇道补缩已经消除，但在圆

柱与法兰相连接的根部倒角内部仍然有缩孔,探伤结果见图 7。从剖面看,圆环及法兰盘相交处热节位置分散,且拐角处散热慢,在凸耳热节处增加补缩浇道,单个内浇道的有效补缩距离 L 为 3.5δ ,法兰盘展开后($\phi 150\text{ mm}\times\pi$)约为 471 mm,大于两个内浇道的补缩距离 $L=2\times 3.5\times 25\text{ mm}=175\text{ mm}$,对距离补缩区域较远的法兰根部倒角肥厚区域补缩不足,出现缺陷。因此,针对以上两点分析,需要调整内浇道位置及冒口结构。

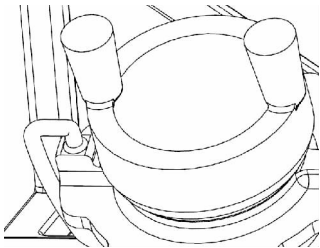
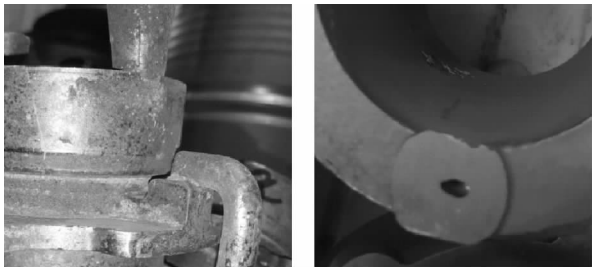


图 5 改进方案 1
Fig.5 Optimized scheme 1



(a) 毛坯 (b) 冒口根部缩孔
图 6 改进方案 1 铸件冒口根部缩孔特征

Fig.6 Riser root shrinkage characteristics of castings in the optimized scheme 1

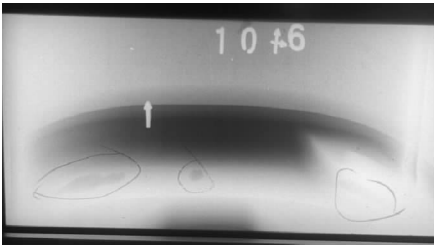


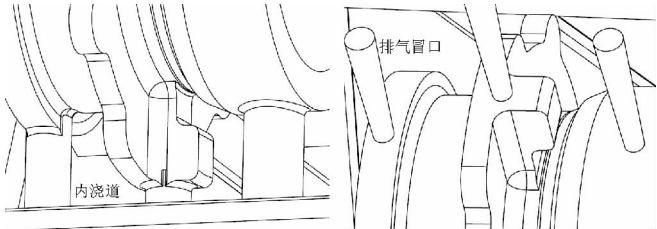
图 7 改进方案 1 铸件内部沿法兰盘与圆环相交处 X 光探伤结果

Fig.7 X-ray flaw detection along the intersection of flange and ring inside castings in the optimized scheme 1

4 改进方案 2

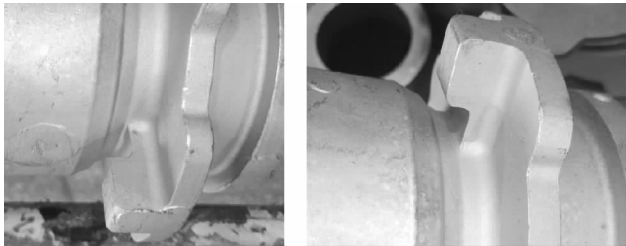
改进方案 2 是将浇注位置改为法兰立式,见图 8,同样采用底注,包括法兰侧立一端设置内浇道,缩短钛液流程,使钛液经过铸件热节处的多个内浇道迅速平稳地到达型腔,在真空凝固时热节处能够得到钛液补缩,保证内浇道的补缩效果。同时将原工艺冒口改为排气冒口,设在铸件高点薄处,减小冒口颈截面尺寸,加长冒口长度尺寸,在不增加冒口质量的同时提高了冒口的补缩能力。用华铸 CAE 模拟软件进行模拟验证,改进工

艺后的铸件冒口根部与铸件连接处的缩孔完全引到排气冒口中,法兰拐角位置得到补缩,铸件没有缩孔。将改进工艺实施后,对铸件冒口根部、法兰根部及凸耳部位进行密实度解剖检查,X 光探伤无缩孔,荧光渗透检验无缩松。投入批量生产,经过整体 X 光探伤及局部探伤,均未发现缩孔、缩松,探伤合格率达到 100%,荧光检验表面品质良好,满足 GJB2896A-2007 II 类铸件要求。铸件浇注后外观以及内部沿法兰盘与圆环相交处 X 光探伤结果见图 9 和图 10。



(a) 内浇道设置 (b) 排气冒口设置

图 8 改进方案 2
Fig.8 Optimized scheme 2



(a) 内浇口处形貌 (b) 凸耳形貌

图 9 改进方案 2 铸件外观形貌
Fig.9 Casting profiles after in the optimized scheme 2



图 10 改进方案 2 铸件内部沿法兰盘与圆环相交处 X 光探伤显像

Fig.10 X-ray flaw detection at the intersection of flange and ring inside the castings in the optimized scheme 2

5 结 论

(1)ZTA15 钛合金安装座采用法兰垂直侧立式底注浇注方式,充型平稳且连续在铸件顶部厚壁部位设置排气冒口,型壳中气体能够顺畅排出,减少铸件内部的气孔、缩孔。

(2)ZTA15 钛合金安装座铸造工艺采用从热节部位分散设置内浇道,内浇道短,防止流通热效应导致局部过热产生局部的缩孔、缩松;法兰盘侧面设置随形冒口,减小冒口截面尺寸,加高冒口颈高度,杜绝了冒口颈

交流磁场对 Al-Fe-Sc-Zr 合金组织及硬度的影响

李志伟¹ 周 全¹ 董建军² 陈乐平¹ 魏陈阳¹
(1.南昌航空大学航空制造工程学院;2.南昌航空大学图书馆)

摘 要 利用 OM、XRD、电子布氏硬度计等测试手段,探究了连续交流磁场电压和间断交流磁场的放电频率和占空比对 Al-Fe-Sc-Zr 合金凝固组织和硬度的影响。结果表明,连续和间断交流磁场均可以有效细化合金的凝固组织,其初生 Al₃Fe 相由粗大的长针状变为细小的短棒状,合金的力学性能均有所提高。在 0~300 V 内,随着交流电压增加,初生 Al₃Fe 相长度先增加后减小,转折点后为 100 V;当电压为 100 V 时,初生 Al₃Fe 相聚集在试样边部,且试样心部硬度高于试样边部硬度。当放电频率在 0~10 Hz 内或占空比在 10%~30% 内,随着放电频率或占空比的增加,初生 Al₃Fe 相长度均逐渐减小。合金的布氏硬度与初生 Al₃Fe 相的平均长度基本对应。

关键词 Al-Fe-Sc-Zr 合金;连续交流磁场;间断交流磁场;凝固组织;硬度

中图分类号 TG146.21;TG156.9 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of AC Magnetic Field on Structure and Hardness of Al-Fe-Sc-Zr Alloy

Li Zhiwei¹, Zhou Quan¹, Dong Jianjun², Chen Leping¹, Wei Chenyang¹
(1.School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University;
2. Library of Nanchang Hangkong University)

Abstract: Effects of voltage of continuous AC magnetic field as well as discharge frequency and duty cycle of discontinuous AC magnetic field on solidification structure and hardness of Al-Fe-Sc-Zr alloy were explored by means of OM, XRD, electronic brinell hardness tester. The results indicate that both continuous AC magnetic field and discontinuous AC magnetic field can refine grains of the alloy, where primary Al₃Fe phase is transformed from coarse long needle to fine short rod shape, and mechanical properties are all improved. In the range of 0~300 V, with the increase of AC voltage, the length of primary Al₃Fe phase is increased at first and then decreased, and the turning point is 100 V. When the AC voltage is 100 V, the primary Al₃Fe phase gathers at the edge of the specimen, and the hardness of the center part is higher than that of the edge part. When the discharge frequency is 0~10 Hz or the duty cycle is 10%~30%, with the discharge frequency or duty cycle increasing, the length of primary Al₃Fe phase is decreased gradually. Brinell hardness of the alloy basically corresponds to the average length of primary Al₃Fe phase.

Key Words: Al-Fe-Sc-Zr Alloy, Continuous AC Magnetic Field, Discontinuous AC Magnetic Field, Solidification Structure, Hardness

收稿日期:2022-04-14;修改稿收到日期:2022-05-17
基金项目:上海航天科技创新基金资助项目(SAST2019-130)
第一作者简介:李志伟,男,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1786155892@qq.com
通信作者:周全,男,1976 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:lgclzq@sina.com
引用格式:李志伟,周全,董建军,等. 交流磁场对 Al-Fe-Sc-Zr 合金组织及硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):105-110.
LI Z W, ZHOU Q, DONG J J, et al. Effects of AC magnetic field on structure and hardness of Al-Fe-Sc-Zr alloy[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2023, 43(1):105-110.

缩孔产生。
(3)ZTA15 钛合金安装座铸造工艺二次优化后,批量生产结果表明,铸件无缩孔、缩松,内部品质满足 GJB 2896A-2007 中 II 类铸件要求,X 射线检测合格率达 100%。

参 考 文 献

[1] 陈红,刘宏宇,苏贵桥,等.ZTA15 铸造钛合金材料的性能与应用[J].铸造,2007,56(6):645-647.

[2] 潘恒沛,陈洁明,张利娟,等.ZTA15 钛合金铸件开裂原因分析[J].热处理,2021,36(2):48-50.

[3] 赵群宪,衣延山,王勇杰,等.改进浇注系统解决铸件缩孔缺陷[J].现代铸铁,2012,32(4):51-54.

[4] 许云祥.熔模铸件冒口当量热节设计法[J].特种铸造及有色合金,2006,26(2):108-110.

[5] 罗均强.熔模铸造中铸件缩孔的特殊解决方案[J].特种铸造及有色合金,2010,30(7):652-652.

[6] 李德臣.用热冒口消除消失模铸件缩孔[J].铸造技术,2010,31(6):804-805.

(编辑:刘卫)