

## 钛合金裂纹产生原因及改进工艺

吴晓明,王 玉,郭 蓓,高 斌,高怀胜,杨欢庆  
(西安航天发动机有限公司,陕西 西安 710100)

**摘 要:**针对某型号发动机壳体组件水力试验后进口段荧光线性缺陷问题,通过对缺陷进行宏观观察、金相组织检查、断口分析、材料成分分析和硬度检查,确定了缺陷类型产生原因。运用 Procast 铸造仿真模拟软件开展了针对性的改进工艺研究。结果表明:进口段荧光线性缺陷为裂纹,呈典型的准解理断裂特征。表层脆而硬的富氧层是导致壳体开裂的诱因,其形成与补焊有关。基于仿真模拟的改进工艺成功将缺陷转移至冒口,减少铸件内部缺陷数量,降低补焊量;使用氩气保护箱改善气体保护效果,提高补焊质量。改进措施实施后,铸件、零件以及组件的荧光检查均一次合格,并且顺利通过地面试车考核,解决荧光线性缺陷问题,消除了薄弱环节,提高了发动机的可靠性。

**关键词:**钛合金;裂纹控制;仿真模拟;铸造工艺优化;气体保护

**中图分类号:**V463 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2019)06-0078-06

## The research on defect analysis of titanium alloy and improved process

WU Xiaoming, WANG Yu, GUO Bei, GAO Bin, GAO Huaisheng, YANG Huanqing  
(Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The problem of fluorescence linear defect after hydraulic test of a certain type of engine shell component was discussed, the defect type and generating reasons were researched by macro-observation, metallographic technology, crack analysis composition analysis and harness checking. Procast casting simulation software was used to improve the process. The results show that defect type is crack, showing the quasi cleavage crack. The surface oxygen rich layer caused the crack of the shell. The crack formation is related to repair welding combined with the production process. The improved process transferred the defects to the riser by simulation, reduced the number of defects and repair welding. The Argon gas shield was used to improve the efficiency of shielding and quality of repair welding. By using above measures, the fluoroscopy results of casting, component and groupware were qualified. In addition, the product passes the ground test. The problem of fluorescence defects is solved, the weak link is eliminated, and the reliability of the engine is improved.

**Keywords:** titanium alloy; crack control; simulation; casting process improvement; gas protection

收稿日期:2018-01-23;修回日期:2018-07-12

基金项目:总装部产品化推进工程项目(2013ZZB·JY3013M)

作者简介:吴晓明(1991—),男,硕士,工程师,研究领域为钛合金熔模精密铸造

## 0 引言

液体火箭发动机作为一个高功率的热机,在高温、高压、大震动的恶劣环境下工作,高可靠性、长寿命是航天工作者不断追求的目标<sup>[1]</sup>。在产品制造过程中可靠性增长可以通过采取有效的工艺改进措施,逐步改进产品制造过程中的薄弱环节,提高产品的可靠性<sup>[2]</sup>。为提高产品的可靠性,应系统开展设计方案工艺可行性、质量问题剖析、方案优化和改进工作,切实实现工艺设计由简单满足产品设计,适应单件研制、小批量生产向适应多产品、变批量生产转变。

壳体组件进口段是某型号发动机重要组成部分,是煤油从喷嘴环进入诱导轮的流道,对进入诱导轮的液体进行导流、整流,同时依靠内部结构平衡预压泵转子轴向力<sup>[3]</sup>。其材质为 ZTC4,采用熔模精密铸造工艺生产。

某批壳体组件进口段水力试验后,荧光检查发现过渡圆角、法兰外壁存在多处荧光线性缺陷,表面打磨排除缺陷形成的凹坑,影响液流数据以及转子轴向的平衡,降低发动机的可靠性,同时延长交付周期,影响发动机的装配进度。

本文以质量问题为突破口,通过缺陷宏观、微观分析,结合生产流程,确定问题症结。依托 Procast 数字化仿真模拟软件,优化铸造工艺,加强质量管控要求,提高产品质量,为落实产品设计可靠性提供保证,提高发动机整体可靠性。本文所述质量问题缺陷分析以及基于数字化仿真技术工艺改进方法对于液体火箭发动机其他钛合金产品具有借鉴意义。

## 1 质量问题分析

### 1.1 宏观组织分析

钛合金进口段荧光缺陷位置如图 1(a)所示,主要出现在入口法兰内壁、外壁。采用光学显微镜对线性缺陷进行宏观检查,该缺陷呈现裂纹特征,裂纹附近区域出现深蓝色斑点。裂纹走向曲折,伴有开叉,内部未见填充物,如图 1(b)所示。

将裂纹打开,断口宏观形貌如图 1(c)所示,裂纹断口比较平直,无明显的塑性变形,表面未见腐蚀产物。表层可见深度为 1~2 mm 蓝色氧化层。

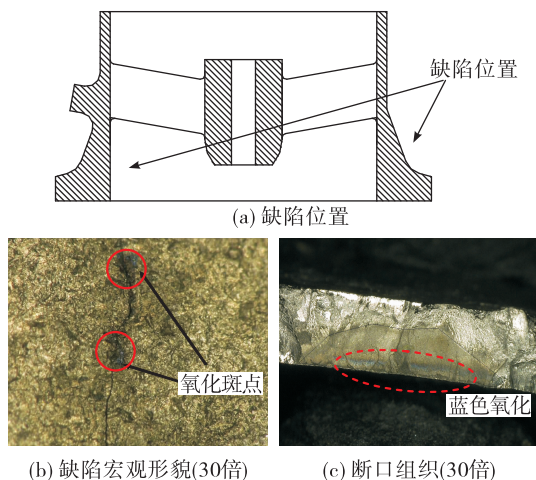


图 1 缺陷宏观观察

Fig. 1 Macrograph of the defect

### 1.2 微观分析

#### 1.2.1 断口微观组织分析

采用 Tescan VEGA 型扫描电子显微镜对裂纹断口进行观察,裂纹从表面向内部扩展,断口区域表面光洁,未见腐蚀产物。断口源区放射棱线清晰可见,出现河流状花样,为典型的准解理开裂特征<sup>[4]</sup>,如图 2 所示。

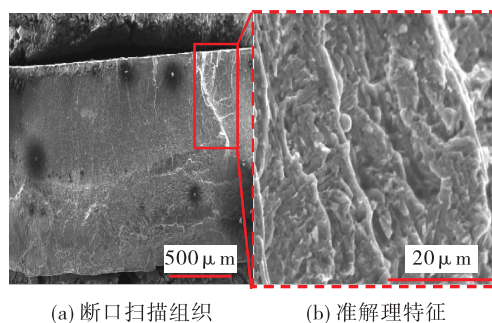


图 2 断口微观观察

Fig. 2 Micrograph of crack

#### 1.2.2 断口成分分析

断口超声波清洗后,使用 SEM 配备的能谱仪进行成分检测,检测结果如图 3 所示。断面成分以 Ti, Al, V, O 为主,无其他腐蚀产物,排除汞、镉、银、铜等液态金属致脆导致开裂<sup>[5]</sup>。

内、外壁表面及中心处各切取厚度 1 mm 的薄片进行 N, H, O 元素的化学分析,内、外壁附近的氧含量均超出标准 GJB2896-2007 要求,各部位的成分如表 1 所示。

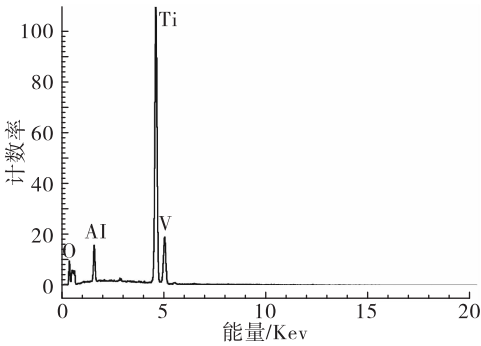


图 3 能谱检测结果  
Fig. 3 EDS result of the crack surface

表 1 N,H,O 元素分析结果  
Tab. 1 The component analysis results of N,H,O  
单位: %

位置	成分		
	N	H	O
内壁附近	0.016	0.003 1	0.38
中心部位	0.017	0.003 1	0.13
外壁附近	0.014	0.003 0	0.34
标准值	≤0.05	≤0.015	≤0.20

1. 2. 3 金相组织分析

截取金相试样,磨制、抛光后采用 HF + HNO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O 腐蚀液进行腐蚀,使用 Olympus-PMG3 型金相显微镜观察裂纹形态。从金相照片可以看出,裂纹从铸件表面沿片层的生长方向向下延伸,走向曲折,并伴有分叉,裂纹尖端较圆钝,裂纹区域未见铸造冶金缺陷,同时也并未存在填充物,如图 4(a)所示。裂纹附近可见明显补焊痕迹,沿熔合线走向开裂,如图 4(b)所示。

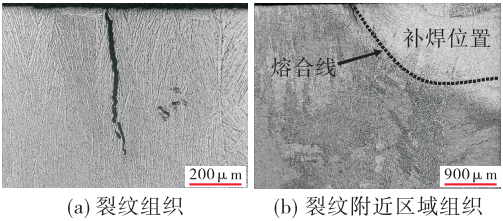


图 4 裂纹形态  
Fig. 4 Appearance of the crack

1. 3 显微硬度分析

对过渡圆角内外壁及中心部位的硬度进行测

定,内、外壁表层附近硬度水平较高,硬度向中心部位逐渐递减,距外壁表层 0.9 mm 处、距内壁表层 2.5 mm 处的硬度可基本降至与心部硬度(290 HV)同等水平,如图 5 所示。表层因硬度偏高而出现材料脆化,在应力释放过程中,脆性层优先崩裂,成为裂纹源,引起开裂。

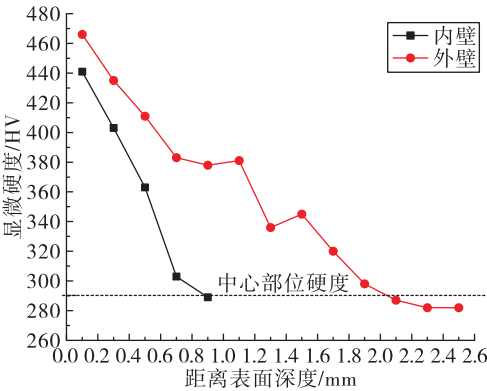


图 5 内外壁硬度梯度图  
Fig. 5 The results of the hardness

1. 4 结果分析与讨论

试验结果表明,壳体组件进口段裂纹起源于表面,走向与表面应力垂直,断口平直,未见塑性变形,宏观上呈现脆性断裂特征,微观上断口为河流状花样,其间伴有少量韧窝,为典型准解理断裂特征。断口成分以 Ti,Al,V,O,C 元素为主,未见其他腐蚀产物以及耳状凸起。结合钛合金失效方式微观特征<sup>[6-10]</sup>(见表 2)以及生产流程<sup>[11-12]</sup>,排除应力腐蚀破裂、氢脆以及凝固破裂。

钛合金氧化色与温度有关,具体特征为银灰色(300 ~ 400 ℃)、黄色(350 ~ 600 ℃ 逐渐加深)、紫色/绿色/蓝色(600 ~ 650 ℃)、灰褐色及褐色(650 ℃ 以上)<sup>[13-15]</sup>,由裂纹附近的金黄色、蓝色斑点、断口表层蓝色氧化色、表层氧含量超出标准值以及表层硬度偏高可推断出裂纹附近区域存在 600 ℃ 以上高温氧化过程。同时裂纹沿熔合线进行扩展,附近区域可见明显的补焊痕迹。

综上所述,钛合金进口段表面裂纹是由于补焊过程中气体保护效果差,高温吸氧形成富氧层,与基体相比,呈现高硬度、低塑性特征,在去应力退火应力释放过程中产生开裂。

表 2 钛合金常见开裂方式			
Tab. 2 The familiar fracture pattern of Titanium Alloy			
类别	特征	形貌	工序
应力 腐蚀	穿晶断裂, 裂缝扩展方向可见看到许多羽毛状结构	宏观断口可见明显腐蚀产物,断口平直,与主应力方向垂直,没有剪切唇口,没有明显的塑性变形	酸洗
氢脆	沿晶或穿晶断裂,羽毛状结构分布解理阶面上	宏观断口表面干净,无腐蚀产物,断口平齐,裂纹呈现断续而弯曲的锯齿状,裂纹一般不分叉	酸洗
凝固 破裂	解理或准解理破裂	破裂沿树枝状结构或沿晶界进行,断裂面上可看到耳状突出物或各形状树枝状结构物	焊接 熔炼
富氧 破裂	解理或准解理破裂	河流状花样	补焊

2 改进措施

2.1 铸造工艺方案优化

进口段原浇注方案采用侧注式,厚大法兰无法

放置冒口补缩,易产生疏松缺陷。本文采用底注式取代原浇注方案,分别从上端面、下端面引入浇注系统,确保金属液充型平稳。

通过采用 Procast 进行充型及凝固过程仿真模型,充型结果如图 6 所示。

充型 2.46 s 时合金流经横浇道通过内浇道进入型腔,开始沿高度方向自下而上进行充型。分别于 4.6 s,5.5 s 完成充型,两种方案充型时间均较短,过程平稳,无湍流现象,有利于排气排渣,表明浇注位置与浇注系统的设置合理。

凝固后缩孔分布如图 7 所示,方案二在法兰处出现缩孔,而方案一则将缺陷从法兰处引入冒口。由图 6(d)可以看出,浇注系统金属液温度低于液相线,铸件补缩只能依靠冒口,方案二法兰部位温度高于其他部位,冒口与法兰间金属凝固,补缩通道关闭,该处凝固收缩后得不到金属液的补充而出现集中缩孔,而方案一冒口根部温度高于其他部位,补缩通道畅通,故法兰处无缩孔缺陷。因此选择从上端面引入的底注式浇注方案。

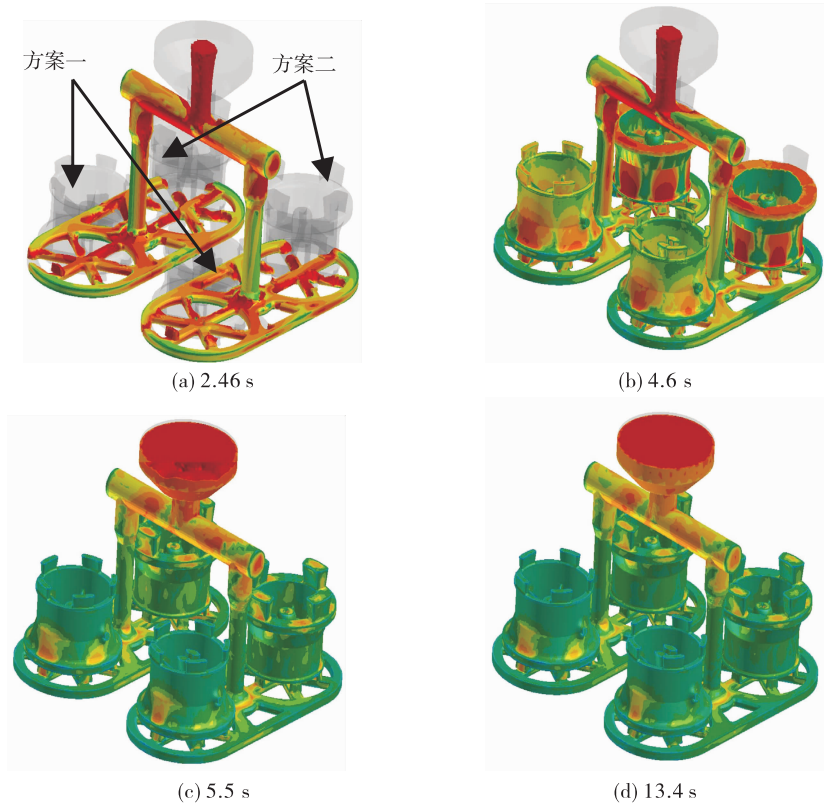


图 6 充型过程温度分布  
Fig. 6 Temperature field of mold filling



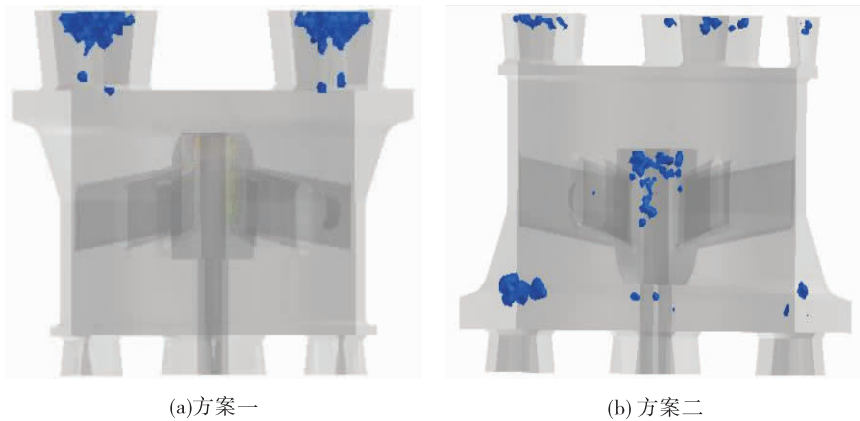


图 7 缩孔预测分布

Fig. 7 Distribution results of shrinkage

2.2 改善气体保护

钛合金活性大,表面易氧化形成富氧  $\alpha$  层,在应力作用下,引起表面开裂,因此补焊时需进行气体保护。传统气体保护方式在大气环境中施焊,利用焊枪喷嘴、拖罩和背面保护装置通以适当流量的 Ar 或 Ar + He 混合气体,把焊接高温区与空气隔开,以防止空气侵入而沾污焊接区的金属,这是一种局部气体保护的焊接方法。当焊件结构复杂,局部气体保护装置不易放置,导致气体保护效果差。本方案采用氩气保护箱(图 8),箱体在焊接前先抽真空,然后充惰性气体,将焊接高温区与空气完全隔开,提高气体保护效果。



图 8 氩气保护箱

Fig. 8 Box of argon protection

3 验证效果

工艺优化控制措施应用到铸件生产中,X 光透视法兰处铸造缺陷数量由改进前 13 处减少为 1 处,

平均打磨深度由 2.7 mm 减少为 0.5 mm,如图 9 所示,法兰处缺陷数量明显减少,程度明显减轻,与仿真预测结果一致,铸造工艺优化效果明显。采用箱内焊接,提高气体保护效果,补焊一次合格率由 70% 提高至 95%。

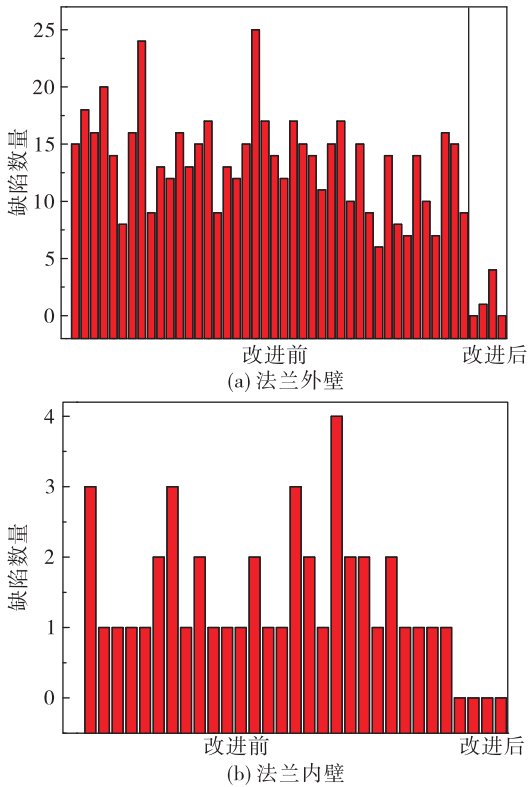


图 9 改进前后不同部位缺陷数量统计

Fig. 9 The number of defects before and after improvement

4 件产品热处理后荧光检查均一次合格,解决了荧光线性显示问题。改进后铸件理化性能、内部

质量(X光透视)、表面质量(荧光检查)、尺寸、液压强度测试、水力试验均符合设计要求,改进措施有效,效果明显。

## 4 结论

1)通过对进口段荧光线性缺陷问题进行宏观、微观形貌观察、材料成分检测,确定缺陷类型为裂纹,结合裂纹特征以及生产流程,排除了应力腐蚀开裂、氢脆、凝固破裂等可能原因,确定了裂纹为富氧破裂,其产生与补焊过程有关。

2)针对薄弱环节,应用仿真模拟技术进行工艺优化,将缺陷由法兰R角引至冒口中,提高铸件内部质量,缺陷数量大幅减少。采用氩气保护箱整体保护方式,提高气体保护效果,补焊合格率大幅提高,荧光检查均一次合格,解决进口段表面裂纹质量问题,可靠性试车考核合格,消除薄弱环节,大幅提高了发动机的使用可靠性。

### 参考文献:

- [1] 谭松林,李宝盛. 液体火箭发动机可靠性[M]. 北京:中国宇航出版社,2014.
- [2] 朱耀龙,李护林,郭国长,等. 液体火箭发动机工艺与过程关键特性研究[J]. 火箭推进,2014,40(6):64-68,73.  
ZHU Y L, LI H L, GUO G C, et al. Research on key features of liquid rocket engine manufacturing technique and process[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(6): 64-68, 73.
- [3] 李向阳,王晓锋,宣统,等. 液氧/煤油发动机煤油预压涡轮泵技术[J]. 火箭推进,2009,35(1):16-20.  
LI X Y, WANG X F, XUAN T, et al. Techniques of kerosene booster turbopump for LOX/kerosene staged combustion cycle engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2009, 35(1): 16-20.
- [4] 崔贤贤,王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998.
- [5] 刘道新,马宗耀,何家文,等. 钛合金的银脆、镉脆敏感性及其控制[J]. 材料工程,1998,26(8):20-24.
- [6] 陶春虎,刘庆琰,刘昌奎,等. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [7] 张利军,何春艳,薛祥义,等. 钛合金冶金缺陷实例分析[J]. 理化检验(物理分册),2013,49(12):819-822.
- [8] 王海杰,王佳,彭欣,等. 钛合金在3.5% NaCl溶液中的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报,2015,35(1):75-80.
- [9] 陈星,董志国,姜涛,等. 富氧 $\alpha$ 层对钛合金直角接头开裂的影响[J]. 失效分析与预防,2011,6(3):178-181,198.
- [10] 何磊. 钛合金海水管路腐蚀与污损防护研究进展[J]. 材料开发与应用,2017,32(3):121-126.
- [11] 刘彦杰,杨俊,吴建军,等. 钛合金喷嘴器扩散钎焊失效分析与改进研究[J]. 火箭推进,2012,38(4):60-67.  
LIU Y J, YANG J, WU J J, et al. Failure analysis and improvement on diffusion brazing of titanium alloy injector[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2012, 38(4): 60-67.
- [12] WANG H J, WANG J, PENG X, et al. Corrosion behavior of three titanium alloys in 3.5% NaCl solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015, 35(1): 75-80.
- [13] XING W, DUAN D P, GUO Y S. Effect of titanium content on the microstructure and mechanical properties of tungsten-titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(6): 1108-1112.
- [14] 张喜燕,赵永庆,白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [15] 曾尚武,江海涛,赵爱民. TC4钛合金高温氧化行为[J]. 稀有金属材料与工程,2015,44(11):2812-2816.

(编辑:马 杰)