

# 钛合金铸件射线检测难发现夹杂物缺陷 分析与优化

张钊骞, 王志明

(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)

**摘要:** 针对钛合金铸件在实际射线检测中出现某种难以发现的夹杂物缺陷, 通过分析铸件浇注过程和研究缺陷的宏观、微观及射线影像, 得出了此类夹杂物的性质和成因。最后提出了提高此类夹杂物缺陷射线检测检出率的工艺优化方向。

**关键词:** 钛合金; 射线检测; 夹杂物

钛合金铸件具有高强度, 在航空航天领域应用越来越多。钛合金铸件主要有气孔、夹杂物、疏松、缩孔、裂纹、流痕和冷隔等铸造缺陷及焊补产生的焊接缺陷<sup>[1]</sup>。经过热等静压处理可消除大部分未与外界相通的疏松和缩孔类缺陷<sup>[2]</sup>。内部质量检测主要采用射线检测方法。通常经过射线检测达到质量控制要求后, 才可以进行下一个工序, 夹杂物类缺陷是检测的重点和难点。

## 1 夹杂物的发现

根据钛合金铸件质量跟踪, 某型号钛合金骨架铸件, 材质为ZTC4, 虽经过射线检测合格, 该骨架铸件在射线检测后未发现夹杂物类缺陷。骨架铸件在蒙皮焊接后, 在斜边与短直角边处出现起皮现象, 起皮部位为铸造表面, 宏观形貌如图1所示, 初步判定为夹杂物。出现了夹杂物外露现象, 因此, 规定的射线检测工艺的检出率很低。

## 2 夹杂物检测

### 2.1 夹杂物宏观形貌

该夹杂物临近表面, 样貌不规则, 缺陷大小约为10 mm × 40 mm, 厚度约为0.5 mm, 其外表面有金属光泽, 为吹砂表面, 内表面颜色比本体略黑, 无金属光泽。取样时发现该缺陷有一定硬度, 韧性差, 脆断。宏观分析为夹杂物。样品外表形貌见图2。

作者简介:

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

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)12-1457-04

基金项目:

机械科学研究总院集团有限公司定向基金(200219ZS01)。

收稿日期:

2021-07-14 收到初稿,

2021-09-01 收到修订稿。

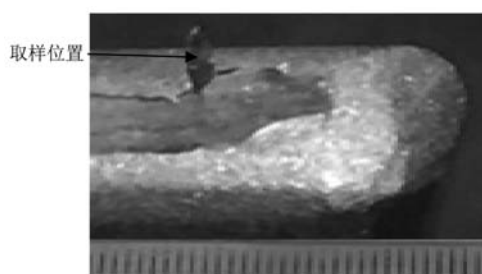


图1 缺陷位置

Fig. 1 Defect location

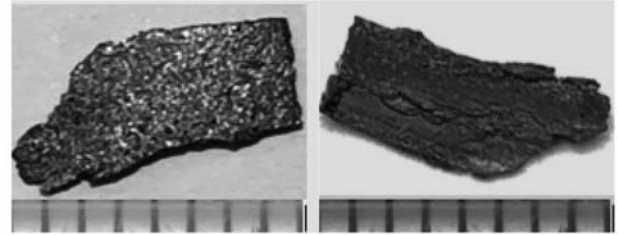
### 2.2 缺陷微观形貌

扫描电镜和能谱检测是失效分析的主要手段<sup>[3]</sup>。夹杂物试样起皮部位外表面为ZTC4铸件喷砂表面形貌，内表面为氧化表面形貌，大部分区域较平坦，有微裂纹存在。外表面扫描电镜微观形貌见图3，其外表面较粗糙，有切削痕迹，其能谱检测结果见图4，外表面主要含有钛、铝、钒、氧、碳等元素。内表面扫描电镜微观形貌见图5，其能谱检测结果见图6，内表面主要含钛、锆、氧、铜、镍、铝、钒等元素。

### 2.3 X射线影像

在复查射线底片时，此类夹杂物的影像不同于容易检测出的石墨型中石墨碎片掉落的较黑的影像，也不同于精铸钛合金铸件型壳碎片等白色的高密度夹杂

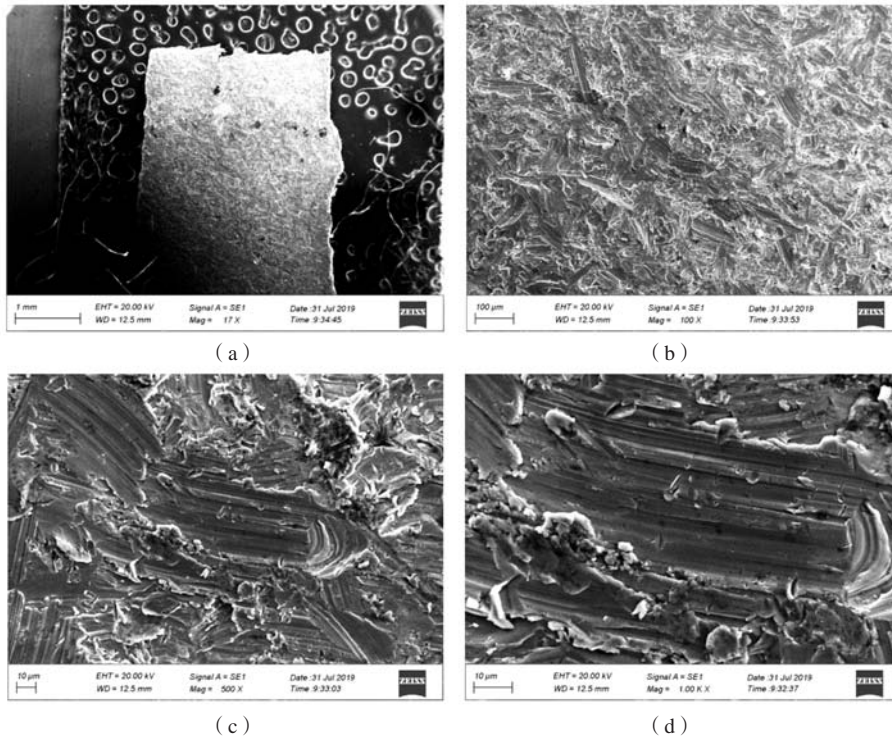
物影像。此类夹杂物在底片上无明显影像，根据缺陷位置反推，或可观察到对比度很低的黑色影像，极难发现。属于普通射线工艺无法检测出的低密度夹杂物类缺陷。该类夹杂物检出率低的原因是，夹杂物和钛



(a) 缺陷取样外表面 (b) 缺陷取样内表面

图2 缺陷取样表面

Fig. 2 Defect sampling surface



(a) (b) (c) (d)

图3 外表面形貌二次电子像(节选)

Fig. 3 Secondary electron image (excerpt) of the external surface morphology

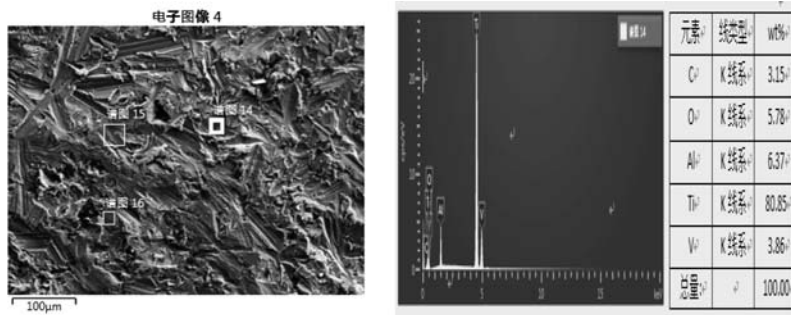


图4 样品外表面能谱分析结果(节选)

Fig. 4 Results of energy spectrum analysis of the external surface of the sample (excerpt)

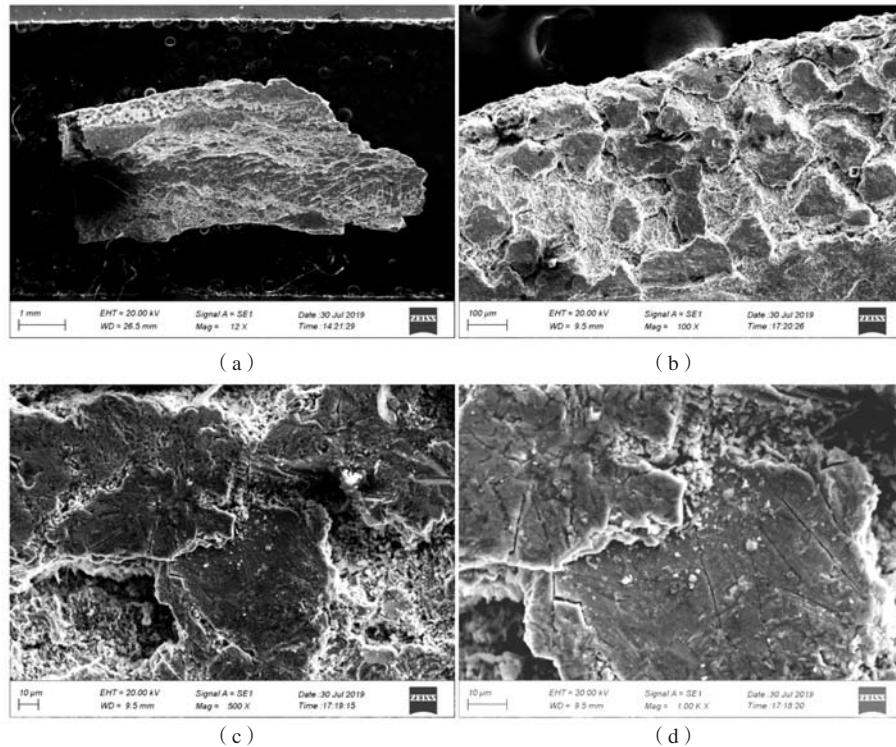


图5 内表面形貌二次电子像(节选)

Fig. 5 Secondary electron image of the internal surface of the sample (excerpt)

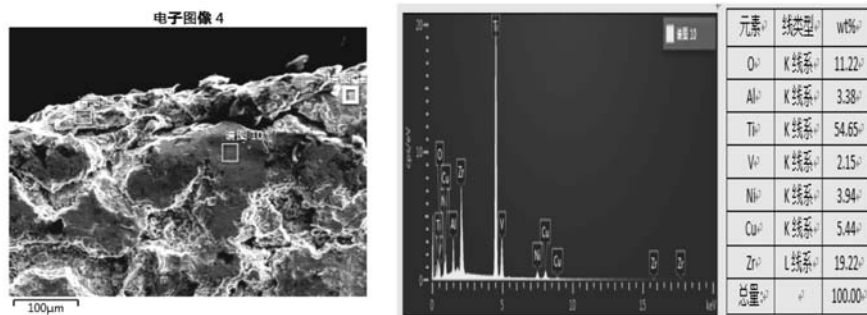


图6 样品内表面能谱分析结果(节选)

Fig. 6 Results of energy spectrum analysis of the internal surface of the sample (excerpt)

合金铸件本体的射线吸收率比较接近, 缺陷在底片上的影像对比度很低, 难以观察。

### 3 夹杂物性质及来源分析

#### 3.1 根据铸造主要过程分析

钛合金铸造方法主要有石墨型铸造和熔模铸造<sup>[4]</sup>。本产品浇注方法是使用真空自耗凝壳熔铸炉, 熔模离心铸造, 浇注的自耗电极(母合金)原料为棒材, 型壳材料为氧化锆, 该骨架材质是ZTC4。同炉批次铸造多件, 该批次无其他铸件发现同类问题。夹杂物宏观形貌, 此夹杂物形状较大, 扁平状, 不符合锻造棒材原材料的夹杂物性质, 夹杂物不应来自原料。

#### 3.2 夹杂物位置分析

夹杂物的位置是铸件外侧尖端, 分析原因是离心浇注受到离心力和浇注系统结构影响, 同时夹杂物尺寸比较大, 缺陷停留在铸件的第一个转角处。

#### 3.3 根据X射线影像分析

根据影像分析, 夹杂物密度与钛合金本体材质对射线的衰减相近但略低, 分析夹杂物的密度略低于本体。

#### 3.4 根据能谱及微观分析

根据微观形貌和夹杂物成分, 两侧表面成分不同, 外表面异常元素是有较高的氧, 内表面有氧、

铜、锆等。判断该夹杂物为氧化物，主体为钛、锆等元素的氧化物。

### 3.5 来源分析

根据以上试验和研究，夹杂物类型是氧化物。根据夹杂物的形貌、性质和浇注过程分析，其成因是在浇注过程中，铜坩埚未清理干净，浇注时在铜坩埚表面残留的铜和钛合金的氧化物，随本次浇注时脱落并与型腔内造型材料粘连而产生。

## 4 解决方案

### 4.1 减少外来夹杂物进入

因夹杂物是外来的，因此要从源头上消除带入夹杂物的可能性。一方面要加强熔炼过程的现场管理，另一方面要加强原材料的质量控制，不仅包括原料母材，也要对辅助原料包括型壳及石墨环、铜坩埚等进行控制。

### 4.2 射线检测工艺优化方向

影响底片质量的因素包括对比度和清晰度，所以需选择有利于提高对比度和清晰度的设备、材料、检测工艺和参数。尽可能减少各种散射线、降低对比度的不利影响。当检测工艺相互影响又不同时有利对比度和清晰度时，优先选择有利于提高对比度的影响。

### 4.3 提高此类夹杂物检出率的具体方法

选择具有高梯度、细颗粒、灰雾度低的底片，有利于提高对比度和清晰度。尽管在各种常用射线标准中大多规定大于100 kV时应使用增感屏，考虑到使用增感屏会降低对比度，为提高对比度从而提高此类夹杂物的检出率，改进工艺不使用增感屏或仅使用后增感屏。

钛合金铸件射线检测中，通常不使用屏蔽板，用后增感屏可以提高增感效果的同时防止背散射的不利影响。在射线改进工艺使用不小于2 mm的铅板屏蔽，同时考虑使用1~2 mm厚度的钢滤板有利于提高对比度。

射线检测通常不规定X射线限束器的使用，但应用射线限束器可以减少外部散射线的不利影响，如果条件具备可选用。

通过射线透射角度的优化结合多角度透射来提高检出率。也可以考虑引入超声测量等新技术。

## 5 结论

通过能谱检测，分析出夹杂物中含有异常元素铜（Cu），并结合钛合金铸造过程和X射线影像分析，证明夹杂物来源于铜坩埚表面残留的铜和钛合金的氧化物。本文给出针对性的射线检测工艺方案，能够提高接近铸件本体射线吸收的夹杂物（如氧化物夹杂物）缺陷的检出率。

#### 参考文献:

- [1] 戴圣龙. 铸造手册: 铸造非铁合金 [M]. 北京: 中国机械工业出版社, 2011.
- [2] 史玉升. 复杂金属零件热等静压整体成形技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018.
- [3] 施明哲. 扫描电镜和能谱仪的原理与实用分析技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [4] 刘喜海, 徐成海, 郑险峰. 真空冶炼 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

## Analysis and Optimization of Inclusion Defects Difficult to Find in Radiographic Testing of Titanium Alloy Castings

ZHANG Zhao-qian, WANG Zhi-ming

(Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Foundry Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China)

#### Abstract:

It is difficult to be detected for some inclusion defects in titanium alloy castings by radiographic testing. This paper firstly pointed out the properties and causes of this inclusions through analyzing the casting process and studied the macro, micro and X-ray images of defects. Moreover, the process optimization method was proposed for improving the detection rate of such inclusions.

#### Key words:

titanium alloy; radiographic testing; inclusion