

钛合金铸件冶金缺陷线性荧光显示的动态定性法

张传明, 张 雷, 孙晓雪, 尉桂芝, 高 晓, 李 凡, 秦飞飞

(中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁沈阳 110043)

摘要: 钛合金铸件冶金缺陷线性荧光显示定性困难, 影响产品质量判定结论。为提高判定准确率, 采集了50件钛合金铸件冶金缺陷线性荧光显示样本, 分析了钛合金铸件冶金缺陷线性荧光显示形貌特点与实际缺陷性质的对应关系, 找出了裂纹、冷隔、线性疏松和线性夹杂类缺陷荧光显示的典型特征。通过开展擦拭技术试验, 总结了线性缺陷荧光显示擦拭后形貌的动态显示特征, 形成钛合金铸件冶金缺陷线性荧光显示动态定性的方法, 为准确判定裂纹、冷隔、线性疏松和线性夹杂等缺陷提供依据。

关键词: 裂纹; 冷隔; 线性疏松; 线性夹杂; 动态定性

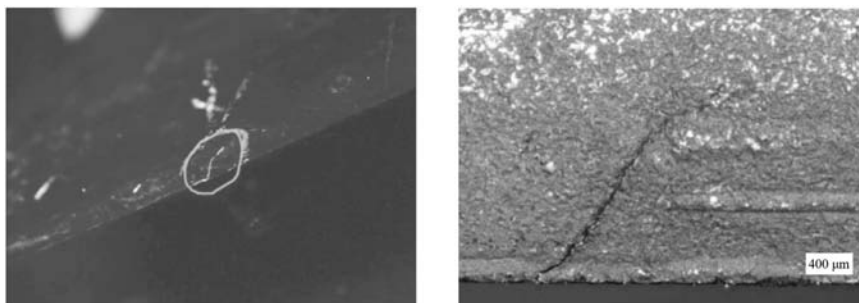
随着航空发动机性能的提升, 对零件表面完整性的要求越来越高, 尤其是线性缺陷, 通常要求进行100%荧光渗透检测, 对线性荧光显示进行缺陷定性和定量后, 做出合格与否的判定。荧光渗透检测作为一种目视检查的宏观检测手段, 对缺陷性质定性较为困难, 检验人员通常需要对缺陷的形成机理和缺陷形貌特征熟练掌握后, 才能判定缺陷性质, 但判定准确率不高。目前国内外关于荧光显示特征分析的资料较少, 也没有相关的判定方法, 荧光显示定性更为困难。

通过荧光显示的擦拭技术, 观察钛合金铸件冶金缺陷线性荧光显示动态发展过程, 结合其金相形貌特征, 形成钛合金铸件线性冶金缺陷荧光显示判定方法, 有助于钛合金铸件的质量评价。

1 样本缺陷分析

1.1 裂纹类缺陷产生的原因及形貌特征

热裂纹是铸造生产过程中最常见的缺陷之一^[1]。简单地说, 热裂纹是高温液态金属凝固时, 由于补缩不足或收缩应力超过了金属当时的强度或塑性产生的裂纹。它主要出现在铸件的拐角处、截面厚度突变处、最后凝固处。其形状特征是: 缝隙宽、形状曲折、裂口沿晶粒边界产生和发展, 缝内呈严重氧化色, 易出现在应力集中区, 典型荧光和金相显示见图1。



(a) 荧光显示

(b) 金相显示

图1 补缩不足产生缩裂的荧光显示和金相显示

Fig. 1 Fluorescence and metallographic display of shrinkage cracks caused by feeding insufficiency

作者简介:

张传明(1979-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为航空发动机无损检测。
E-mail: suolong0928@163.com

通讯作者:

张雷, 男, 工程师。E-mail: zlei0612@gmail.com

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

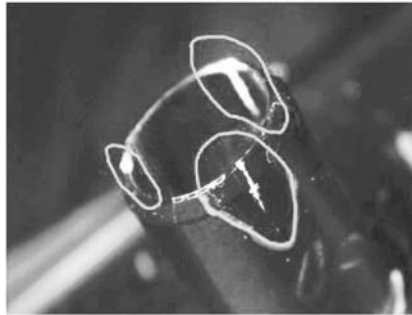
09-1116-06

收稿日期:

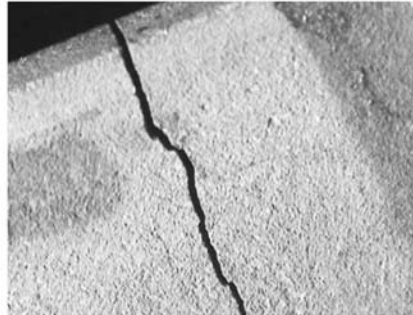
2020-10-01 收到初稿,
2023-06-27 收到修订稿。

冷裂纹也常称为应力裂纹，它主要出现在铸件收缩过程中处于拉伸的部位和应力集中的部位，大型或构造复杂的铸件在截面突变处容易产生冷裂纹。一般在铸件后期加工过程中因为校正、补焊、磕碰等外

力原因也容易导致冷裂纹缺陷。其形状特征是：裂纹细小、裂口常穿过晶粒延伸到整个断面，呈连续直线状，一般表面为金属光泽，有时缝内呈轻微氧化色，典型荧光和金相显示见图2。



(a) 荧光显示



(b) 金相显示

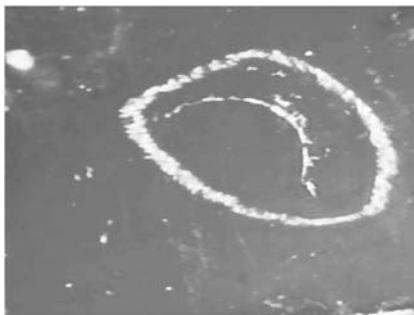
图2 冷裂纹的荧光显示和金相显示

Fig. 2 Fluorescence and metallographic display of cold cracks

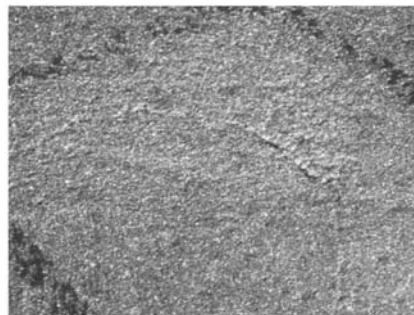
1.2 冷隔类缺陷产生的原因及形貌特征

在铸件中金属流汇合处，如果金属熔液熔合不完善或金属熔液不连续，那么在铸件中将产生穿透或未穿透的缝隙，这就是冷隔缺陷。冷隔缺陷主要出现在铸件远离浇口的宽大表面处和薄壁处。一般与浇注中

断、浇注温度低、铸件设计壁厚薄、型腔内排气不畅等有关^[2]。在铸造中属于比较严重的缺陷，通常可导致铸件的直接报废。冷隔是一种呈现出紧密的、断续的或连续线状的表面铸造缺陷，缺陷外形平滑，开口度不高，典型荧光和金相显示见图3。



(a) 荧光显示



(b) 金相显示

图3 冷隔的荧光显示和金相显示

Fig. 3 Fluorescence and metallographic display of cold shut

1.3 疏松类缺陷产生的原因及形貌特征

产生疏松缺陷主要原因为枝晶间补缩不足和气体未及时排除^[3]。在铸件的厚大部位，经常会出现凝固时枝晶搭桥的现象，阻断了补缩通道，出现封闭熔池，凝固后表现为尺寸较大的疏松，严重的疏松缺陷则表现为缩孔。疏松这些孔洞多存在于零件内部，经抛光或机加工后，露出零件表面。疏松使铸件受力的有效截面减少，实际强度降低，同时还引起应力集中，使铸件从这些部位开始损坏。疏松一般表现为点、条、块状，但有的疏松因局部开裂较大，也会表现出线性特征，典型荧光和金相显示见图4。

1.4 夹杂产生的原因及形貌分析

夹杂类缺陷是铸件中各种金属和非金属夹杂物的总称，非金属夹杂又分为夹杂、夹渣等，金属夹杂有硬点、冷豆、高密度夹杂等。

非金属异物称为非金属夹杂物，它来源于金属熔液内部反应的产物和熔炼过程中形成和分离出来的浮渣、熔剂残渣、脱落的铸型材料等。非金属夹杂物常是氧化物、硫化物、碳化物和硅酸盐等，但主要是氧化物。这些夹杂物多聚集于铸件的某个部位，如铸件内浇口附近表面、转角等部位。渗透检验发现的夹杂多为氧化物夹杂，荧光显示一般呈点状、线条状、网

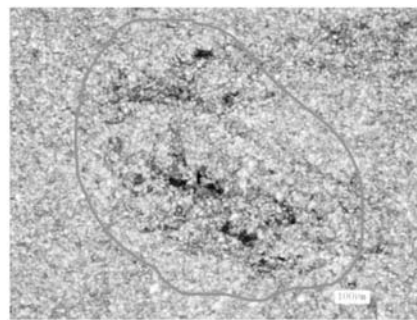
状或团絮状，典型荧光和金相显示见图5。

金属性异物称为金属夹杂物，它主要来源于金属熔液与炉衬和工具等接触过程中发生的各种物理和化学反应的产物，此外也来源于人为因素，如混料等。冷豆是一种特殊的金属夹杂物，其化学成分与铸件相

同，表面有氧化现象，荧光显示一般呈封闭或半封闭的圆形。在样本中发现的3例金属性夹杂均为冷豆，可见冷豆是钛合金精密铸件中比较常见的缺陷之一，典型荧光和金相显示见图6。



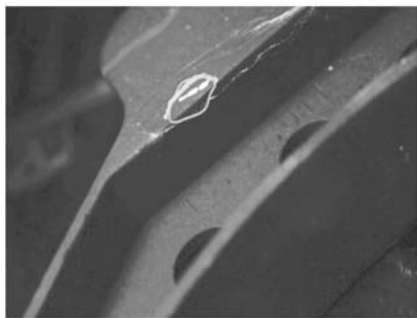
(a) 荧光显示



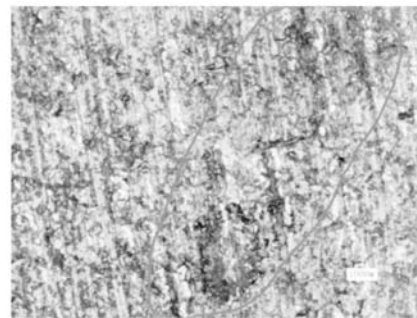
(b) 金相显示

图4 块状疏松的荧光显示和金相显示

Fig. 4 Fluorescence and metallographic display of bulk porosity



(a) 荧光显示



(b) 金相显示

图5 线性夹杂的荧光显示和金相显示

Fig. 5 Fluorescence and metallographic display of linear inclusion



(a) 荧光显示



(b) 金相显示

图6 冷豆的荧光显示和金相显示

Fig. 6 Fluorescent and metallographic display of cold beans

2 荧光显示的擦拭技术及动态显示过程分析

2.1 荧光显示的擦拭技术

掌握铸件缺陷荧光显示与冶金形貌特征对应关

系，对于缺陷性质判定有一定的帮助，但对部分缺陷仍然存在误判的可能。例如，一些深而窄的裂纹类缺陷，由于渗透剂返渗速度快，在裂纹表面往往会形成点状显示，检测过程中误认为其符合验收标准而做出错误判定，这一现象可以用荧光渗透检测基本原理来

解释。

荧光渗透检测过程是将溶有染料的渗透剂施加于被检产品表面，在毛细现象的作用下渗透剂渗入表面开口缺陷中，清除试件表面多余渗透剂，经干燥后施

加显像剂，缺陷中的渗透剂在毛细原理的作用下被回渗到零件表面并形成放大的缺陷显示，在黑光（荧光检测）或白光（着色检测）下观察缺陷显示，其基本检测过程如图7所示。



图7 渗透检测的基本过程

Fig. 7 Basic process of penetrant testing

基于渗透检测基本原理，缺陷最终荧光显示是堆积于开口缺陷附近渗透剂的发光所致，将目视不易察觉的缺陷进行放大并显性化，最终的缺陷显示可能已经失去了缺陷的原有形貌特征。如果仅是通过观察显像后的最终荧光显示，往往很难判定缺陷性质，因此需要采用擦拭技术，通过观察开口缺陷内部渗透剂返渗、显像的整个过程并结合铸件冶金缺陷基本知识来辅助判定缺陷性质。

擦拭技术作为一种辅助手段应用于解释零件上的荧光显示，对任何特定区域或显示允许使用不超过两次。用沾有丙酮的小棉球或毛刷在显示上擦拭，擦拭前应适当挤出棉球或毛刷中多余的溶剂，擦拭后让零件表面干燥（溶剂迅速挥发），立即检查有无重复显示出现以及缺陷动态显示过程，最后重新显像，具体流程如图8所示。

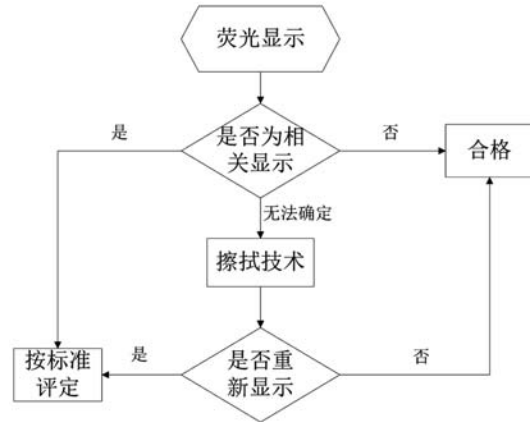
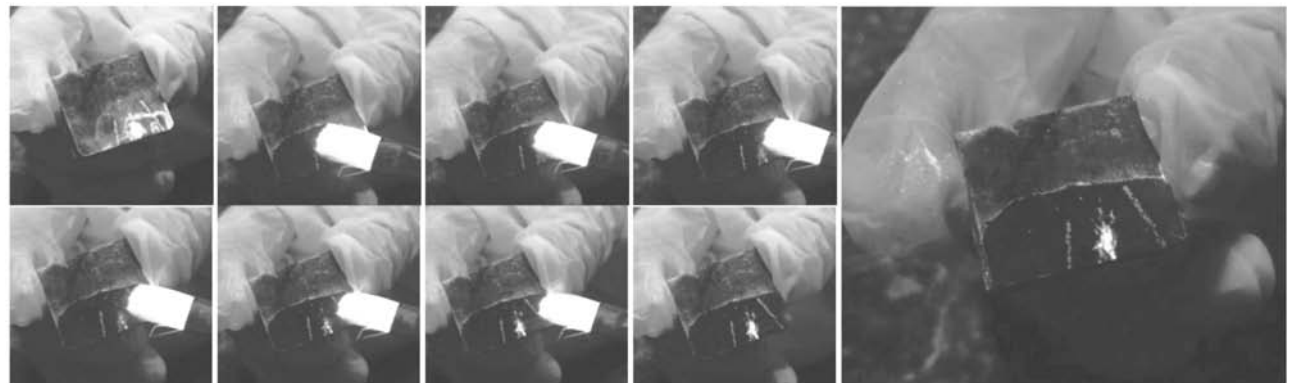


图8 采用擦拭技术的判定流程

Fig. 8 Determination flow of wiping Technology

由于裂纹之间相互影响，最初会形成面积形状显示，对于短小裂纹，由于返渗严重，有时还会形成圆形显示。用沾有有机溶剂的棉球或毛刷擦去显示后，裂纹的枝杈状显示特别明显，同时渗透剂迅速返渗出来，立刻恢复到原有形貌，如图9a所示。施加显像剂重新显像后，显示继续扩展，如图9b所示。



(a) 裂纹荧光显示的擦拭技术

(b) 重新显像后的裂纹荧光显示

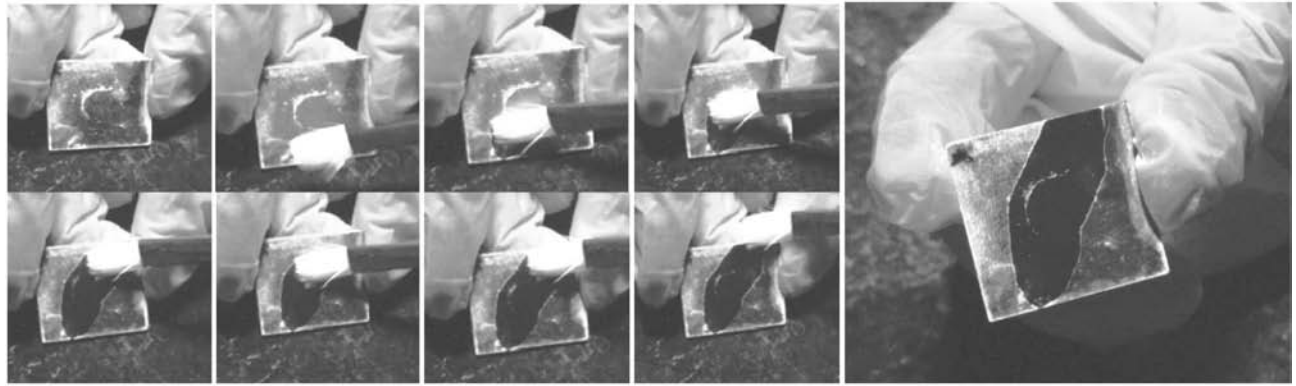
图9 裂纹的荧光显示动态判定过程

Fig. 9 Dynamic determination process of crack fluorescence display

2.3 冷隔缺陷荧光显示采用擦拭技术后的动态特征

冷隔的荧光显示一般呈连续的黄绿色弯曲的线条，有时呈粗大且两侧圆滑的线状，从显示中部到端部由粗变细，两端呈针尖状，显示清晰，重现性好。

用沾有有机溶剂的棉球或毛刷擦去显示后，渗透剂快速返渗出来，恢复到初始的显示形貌，如图10a所示。施加显像剂重新显像后，显示继续扩展，但清晰度会减弱，如图10b所示。



(a) 冷隔荧光显示的擦拭技术

(b) 重新显像后的冷隔荧光显示

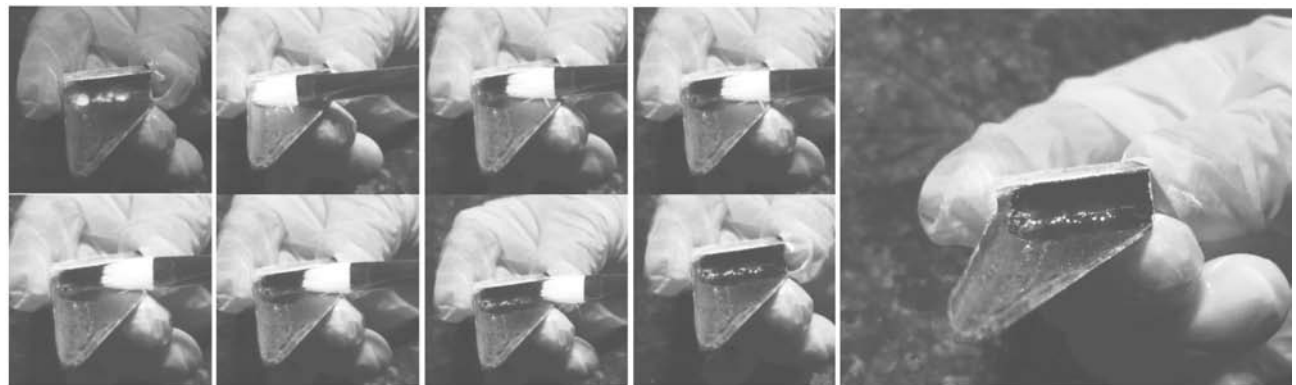
图10 冷隔的荧光显示动态判定过程

Fig. 10 Dynamic determination process of fluorescent display of cold shut

2.4 线性疏松缺陷荧光显示采用擦拭技术后的动态特征

线性疏松荧光显示通常是由很多个靠得很近的黄绿色小亮点连成的线条状显示，由于点状分布的不规则导致条形显示边缘不整齐，粗细变化明显，或者局部有间断现象，线条状显示的两端粗大，荧光显示的

小亮点或短线靠的很近。用沾有有机溶剂的棉球或毛刷擦去显示后，独立的小亮点特征非常明显的显示出来，而且小亮点的渗透剂返渗速度较快，又逐渐扩散连接成线条状，如图11a所示。施加显像剂重新显像后，恢复到初始的显示形貌，但点与点之间的界限会更加明显，如图11b所示。



(a) 线性疏松荧光显示的擦拭技术

(b) 重新显像后的线性疏松荧光显示

图11 线性疏松的荧光显示动态判定过程

Fig. 11 Dynamic determination process of linear loose fluorescent display

2.5 线性夹杂缺陷荧光显示采用擦拭技术后的动态特征

线性夹杂荧光显示一般呈连续或断续的黄绿色直条状显示，中间相对粗大且比较平滑，两端略粗，没有明显的尖角。用沾有有机溶剂的棉球或毛刷擦去显示后，在线条边缘会有渗透剂的返渗，整体返渗速度

缓慢，如图12a所示。施加显像剂重新显像后，恢复到初始的显示形貌，但亮度会有所下降，如图12b所示。

3 结论

(1) 钛合金铸件冶金缺陷荧光显示是铸造过程中冶金缺陷形成机理的本质反映，荧光显示基本保持治



(a) 线性夹杂荧光显示的擦拭技术

(b) 重新显像后的线性夹杂荧光显示

图12 线性夹杂的荧光显示动态判定过程

Fig. 12 Dynamic determination process of fluorescent display of linear inclusions

金缺陷形貌特征。

(2) 通过采用擦拭技术观察渗透剂从线性缺陷中返渗的动态过程发现, 裂纹荧光显示更加明亮, 渗透剂返渗迅速; 冷隔的荧光显示会继续扩展, 清晰度减弱; 线性疏松荧光显示的独立小亮点特征非常明显,

渗透剂返渗速度较快, 后又逐渐扩散连接成线条状; 线性夹杂荧光显示在线条边缘会有渗透剂的返渗, 整体返渗速度缓慢, 施加显像剂重新显像后, 恢复到初始的形貌, 但亮度会有所下降。

参考文献:

- [1] 滕子浩, 廖敦明, 吴棣, 等. 轧辊铸件成形过程热裂纹萌生与扩展数值模拟 [J]. 铸造, 2019, 68 (9): 1042-1047.
- [2] 高志坤, 迟庆新, 卜嘉利. 某涡轮后机匣裂纹失效机理分析 [J]. 航空发动机, 2018, 44 (6): 6-10.
- [3] 李振锋, 胡兵, 钟文惠, 等. DZ22B 高温合金定向凝固叶片铸造缺陷的形成机理研究 [J]. 航空制造技术, 2020, 63 (16): 45-49, 58.

Dynamic Qualitative Method for Linear Fluorescent Display of Metallurgical Defects in Titanium Alloy Castings

ZHANG Chuan-ming, ZHANG Lei, SUN Xiao-xue, WEI Gui-zhi, GAO Xiao, LI Fan, QIN Fei-fei
(AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, Liaoning, China)

Abstract:

The qualitative difficulty of linear fluorescence display of metallurgical defects in titanium alloy castings affects the product quality judgment. In order to improve the accuracy of determination, 50 samples of titanium alloy castings were collected for linear fluorescence display of metallurgical defects. The corresponding relationship between the characteristics of linear fluorescence display of metallurgical defects of titanium alloy castings and actual defect properties was analyzed, and the typical characteristics of fluorescence display of cracks, cold shuts, linear porosity and linear inclusions were found out. In this paper, the dynamic display characteristics of linear defects by fluorescent display after wiping were summarized through the test of wiping technology, and the method of forming the dynamic qualitative method of linear fluorescence display of metallurgical defects in titanium alloy castings was developed, which provided the basis for the accurate determination of cracks, cold shuts, linear porosity and linear inclusions defects.

Key words:

cracks; cold shut; linear porosity; linear inclusions; dynamic qualitative