

# Application News

## No. P103

电子探针显微分析仪 EPMA-8050G、超声波疲劳试验机 USF-2000A

### 金属材料超声波疲劳实验断裂面的观察与分析

通常，金属材料内部的夹杂物可能会成为断裂疲劳源。为评估金属材料的疲劳强度，需要对引起断裂的内部夹杂物进行检查和鉴定。为了观察和测试内部的夹杂物，使用超声波疲劳断裂试验让内部的夹杂物暴露出来进行检测可谓是最佳方法<sup>1)</sup>。

本次我们使用超声波疲劳试验机 USF-2000A 对试样 SNCM439 中的夹杂物进行检测，并使用电子探针显微分析仪 EPMA™-8050G (以下简称 EPMA) 对引起疲劳断裂的夹杂物进行观察与元素的分析。

T. Ono, F. Yano

#### 断面的形貌观察

为了研究疲劳试验后金属材料的断口特征，使用光学显微镜和 EPMA-8050G 进行观察。对试样 1 的整个断面的照片 (光学显微镜) 以及夹杂物附近的放大观察图像 EPMA 的二次电子图像分别如图 1、图 2 所示。断裂起源于内部的夹杂物。

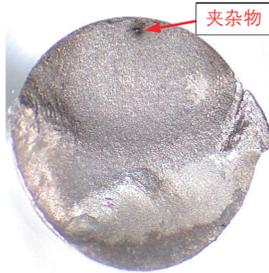


图 1 断面的照片 (光学显微镜)

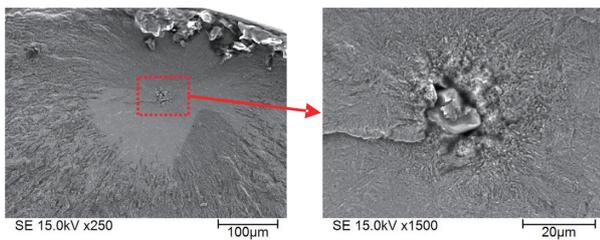


图 2 试样 1 的夹杂物的图像 (二次电子图像)

#### 夹杂物的分析

使用 EPMA 对该夹杂物成分进行面分析，如图 3 所示，夹杂物主要含 Al、Mn、O、S 元素。

为了判断 Al 的化学结合状态，可借助 EPMA 进行状态分析，如图 4 所示。通过比较夹杂物 (图 3(b) 的黄色○部) 和标准样品 (Al、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 的 Al Kβ 线和 sKα 的峰形，可以确认夹杂物为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

面分析结果也显示元素 O 和 Al、S 和 Mn 具有位置上一一对应关系，综合以上分析，判定夹杂物为氧化铝 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 和硫化锰 (MnS) 复合构成。

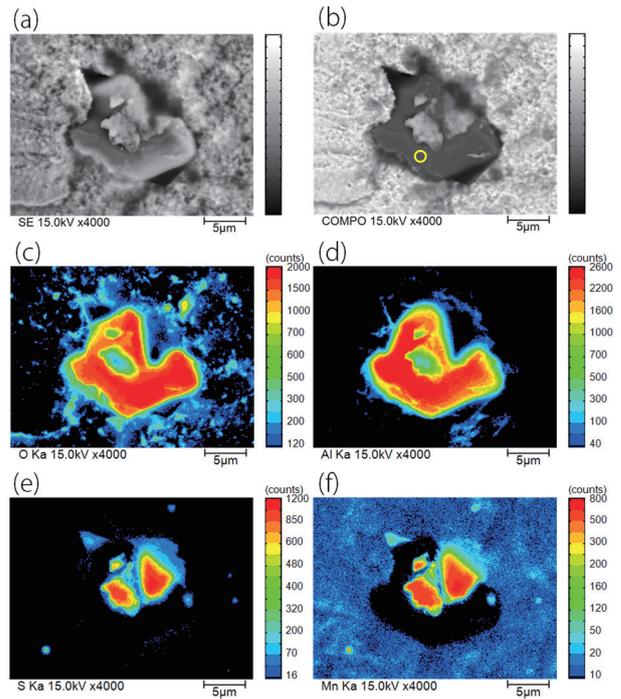


图 3 试样 1 的夹杂物的面分析结果 (a) 二次电子图像、(b) 背散射电子 (组成) 图像、(c) O 分布图像、(d) Al 分布图像、(e) S 分布图像、(f) Mn 分布图像

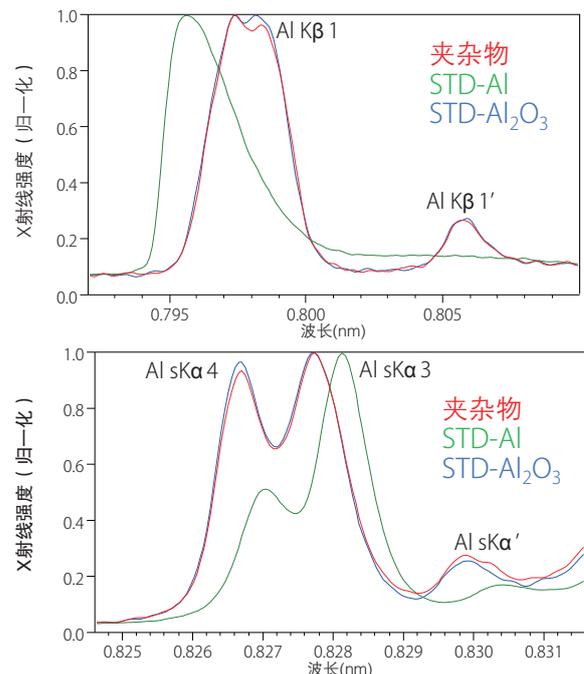


图 4 Al 的状态分析 (上: AlKβ 线、下: Al sKα 线)

## ■ 超声波疲劳试验

通常大多数金属结构件的疲劳强度会在周期使用  $10^6$  次后降低, 并在使用  $10^7$  次后达到疲劳极限, 但不会引起疲劳断裂。然而, 对于已实施淬火和表面处理的高强度金属材料, 其内部的夹杂物会成为疲劳断裂的起源点, 在使用  $10^8 \sim 10^9$  周期后可能会引起疲劳断裂。疲劳强度取决于内部夹杂物的尺寸和种类。因此, 为评估高强度金属材料的疲劳强度, 重点在于掌握金属材料中夹杂物的尺寸和种类。

为能够可靠地检测引起内部断裂原因的夹杂物, 实施疲劳试验可谓最佳手段, 但要想进行超过  $10^9$  次的疲劳试验, 以 10 Hz 周期进行需要约 3.2 年。本次使用的超声波疲劳试验机能够以 20 kHz 的频率进行试验, 仅需要 14 小时左右便可完成 109 次试验。超声波疲劳试验机可谓是一种非常高效的手段。

本次我们使用超声波疲劳试验机 USF-2000A 对试样 SNCM439 进行了检测。试验的情形如图 5 所示, 本次使用的试验装置和试验条件如表 1~2 所示。

基于之前的报告 2), 把引起内部断裂的最大负荷应力设定为 900 MPa。试验结果如表 3 所示。断裂重复次数为  $2.91 \times 10^7 \sim 6.27 \times 10^8$ , 最大超过 10 倍的差异。此外, 断裂均起源于内部夹杂物。

试样 1、2、3 中的断面形貌与夹杂物的图像 (二次电子图像) 分别如图 2 (上一页)、图 6、图 7 所示。结果显示全部试样均是从内部夹杂物开始断裂, 夹杂物成了疲劳断裂的源点。根据图像得的夹杂物的尺寸 (长度方向) 的总结如表 4 所示。表 3 和表 4 揭示了夹杂物的尺寸越大, 断裂重复次数越小, 夹杂物的大小有可能会影响疲劳强度。

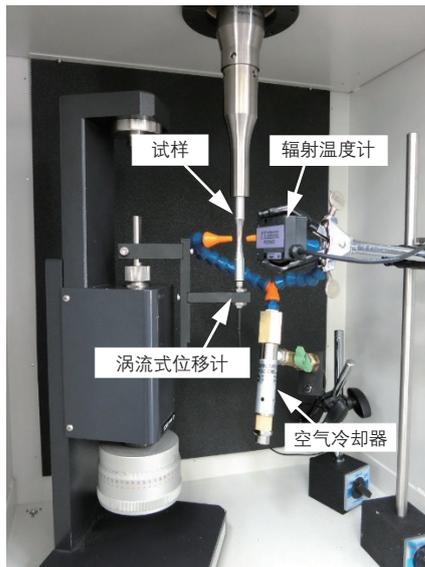


图 5 试验的情形

表 1 试验装置

试验机	: 超声波疲劳试验机 USF-2000A
温度计	: 辐射温度计
位移计	: 涡流式位移计

表 2 试验条件

试样	: SNCM439
最大负荷应力	: 900 MPa
最大重复次数	: $1 \times 10^{10}$
试验数量	: $n = 3$
应力比	: -1
频率	: 20 kHz
间歇性运行	: 振荡时间 300 ms、停止时间 200 ms

表 3 试验结果

试样	最大负荷应力 [MPa]	断裂前重复次数
1	900	$6.27 \times 10^8$
2	900	$1.06 \times 10^8$
3	900	$2.91 \times 10^7$

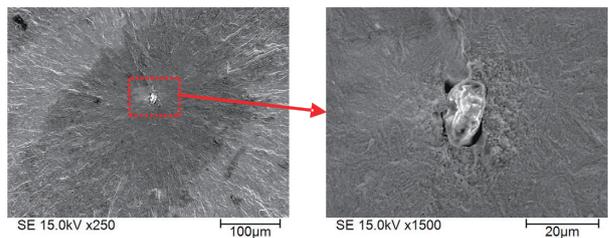


图 6 试样 2 的夹杂物的图像 (二次电子图像)

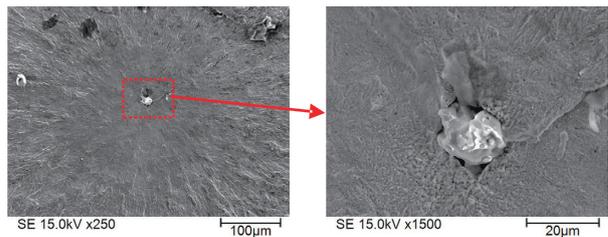


图 7 试样 3 的夹杂物的图像 (二次电子图像)

表 4 夹杂物的尺寸

试样	1#	2#	3#
夹杂物尺寸	16 µm	20 µm	22 µm

## ■ 总结

本文使用超声波疲劳试验机进行了夹杂物相关测试试验。超声波疲劳试验机是一种高效的方法, 可大幅缩短疲劳试验时间。通过使用电子探针显微分析仪对疲劳试验后的金属材料断裂起源点进行了夹杂物的分析, 不仅能够知道夹杂物的大小和各元素的分布, 还能够鉴定化合结合状态。结果显示, 夹杂物的大小与疲劳断裂试验的周期应力加载次数有一定的相关性, 也说明断裂面的观察对疲劳试验非常重要。

### 参考文献

- 1) 古谷佳之、松冈三郎、阿部孝之、铁与钢 Vol.88 (2002) No.10
- 2) 应用新闻 No.i258

EPMA 是岛津制作所株式会社的商标。



岛津企业管理 (中国) 有限公司  
岛津 (香港) 有限公司

<http://www.shimadzu.com.cn>

用户服务热线电话: 800-810-0439  
400-650-0439

### 免责声明:

- \* 本资料未经许可不得擅自修改、转载、销售;
  - \* 本资料中的所有信息仅供参考, 不予任何保证。
- 如有变动, 恕不另行通知。

第一版发行日: 2018 年 3 月