

使用 EPMA 和 X 射线 CT 分析 Fe-Al 异种焊接材料

01-00294-CN

吉见聪、桥本 继之助

特点描述

- ◆ X 射线 CT 可以无损捕捉成分和内部结构的变化，有助于研讨焊接条件等研究。
- ◆ 有助于分析影响焊接强度的金属间化合物层膜厚和内部结构的相关研究。

简介

为了到 2050 年实现碳中和目标，全球都在竭力减轻运输机的重量。摩擦搅拌焊接（FSW：Friction Stir Welding）和摩擦搅拌点焊（FSSW：Friction Stir Spot Welding）是一种利用工具旋转产生的摩擦热量对异种材料进行固相焊接的方法，在汽车行业中用于发动机托架、悬架臂、前副车架等。除汽车之外，还广泛应用于铁路车辆、飞机、船舶、土木工程建筑物、电气设备等多种领域，以实现轻量化的目标。目前，人们正在进行优化焊接工艺控制焊接区界面结构等研究。

本文将结合微焦 X 射线 CT 系统（inspeXio SMX-225CT FPD HR Plus）的结果，向您介绍使用电子探针显微分析仪 EPMA™（EPMA-8050G）分析摩擦搅拌点焊异种焊接区的案例。

摩擦搅拌点焊（FSSW）

对铝合金与镀锌钢板进行 FSSW 时，将由探针和凸肩组成的工具压在铝合金上，搅拌时摩擦阻力产生的热量软化铝合金与钢板的镀层。此时，在排出焊接界面电镀的同时，钢板表面出现新的表面，形成用于焊接的金属间化合物层。FSSW 接头的中心具有一个按钮状的小孔，孔周围形成焊接区，凸肩外侧形成毛刺状的突出部分。

本文在 2 种焊接条件（加压时间：短、长）下，使用 FSSW 制作了铝合金（A6061）和 GA 钢板（高强度钢 + 合金熔融镀锌）试样。（图 1）

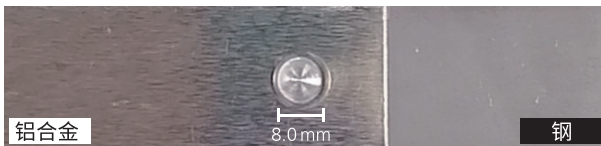


图 1 试样外观（焊接点在中央）

使用 X 射线 CT 系统和 EPMA 进行宏观观察

X 射线 CT 系统可在不破坏的条件下进行截面观察，通过 X 射线可视化物体内部的密度差异（密度越高，显示越白），以此显示任意位置的截面图像。图 2（a）所示为通过焊接中心区的横截面图像，可确认镀层（膜厚：约 6 μm）的锌（Zn）向焊接界面孔周围排出时的密度差异。图 2（b）所示为焊接面（图 2（a）的箭头位置）的纵截面图像，可确认 Zn 向孔周围所有方向排出时的密度差异。

然后，将使用 X 射线 CT 系统无损观察后的试样切断，用树脂包埋后，经研磨制成截面。由图 3 使用 EPMA 进行元素面分析的结果可知，在焊接界面中，镀层中的 Zn 向 FSSW 接头按钮状的小孔外侧排出，仍有部分残留。

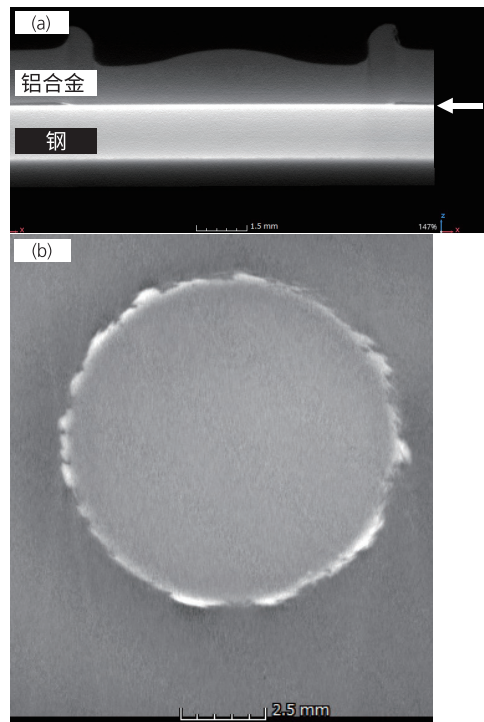


图 2 焊接点的 X 射线 CT 截面图像（加压时间：短）；
(a)横截面，(b)纵截面

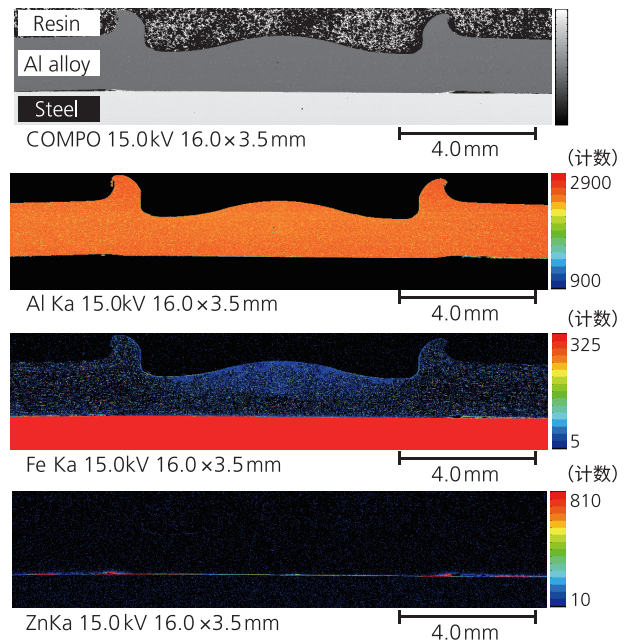


图 3 焊接点截面的 EPMA 元素面分析（加压时间：短）

■ 使用 EPMA 分析焊接区

FSSW 的一大特点是因焊接时热输入量较少，形成的影响焊接强度的金属间化合物 (IMC: Intermetallic compound) 较少。IMC 层中心区的膜厚大于端部，GA 钢则出现类似电镀层置换为 IMC 的现象，导致在整个焊接区域形成数 μm 的 IMC 层。

图 4 所示为在加压时间较短和较长 2 种条件下进行 FSSW 的焊接界面 COMPO 图像，可以看出在 Al 合金和 GA 钢板的焊接界面形成了 IMC 层。

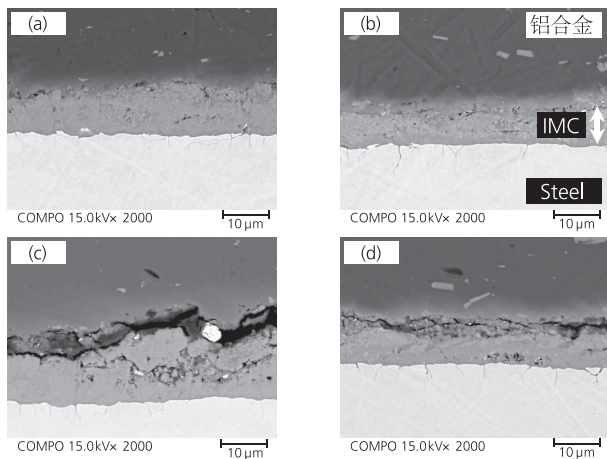


图 4 IMC 层:

(a) 短中心部、(b) 短端部、(c) 长中心部、(d) 长端部

图 5 所示为短加压时间下焊接端部 (图 4(b)) 的元素面分析结果。焊接端部的 IMC 层的膜厚约为 $5 \mu\text{m}$ ，可观察到 Al、Fe 和 Zn 的分布，镀层中的 Zn 并未完全排出，Al 合金侧仍残留较多。图 5 所示为以红色、绿色、蓝色分别 RGB 叠加显示 Al、Fe、Zn 的 Overlay 图像，残留较多 Zn 的区域显示洋红色，Al 和 Fe 的 IMC 层区域显示为金色。

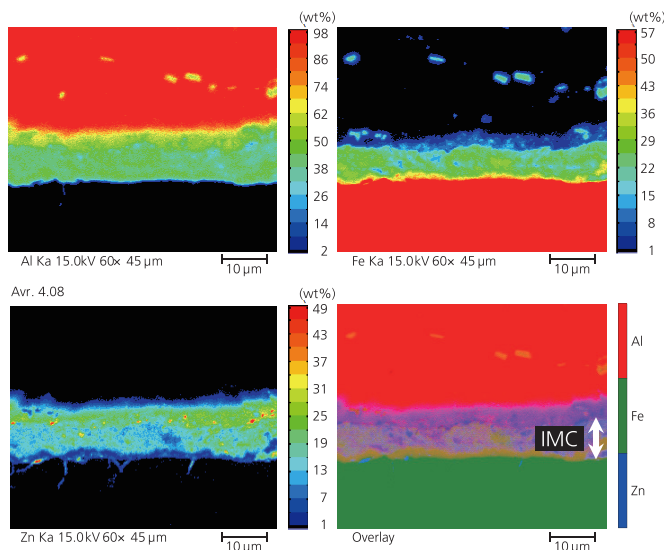


图 5 短端部 (从中心到右侧 (R) 3.69 mm) IMC 层的面分析

■ IMC 层和裂纹

如图 4 所示，IMC 层的膜厚因焊接条件和与中心的距离而有所不同。图 6 所示为相同放大倍率下测量各区域膜厚的结果。从中心向端部的方向，距离越远，IMC 层的膜厚约薄，加压时间越长，整个区域越厚。

焊接界面上 Zn 并未完全排出，仍有残留。与图 5 的 Zn 分布图像相同，图 7 所示为按照焊接条件和与中心的距离计算出的视野内 Zn 平均浓度的测量结果。由于在 FSSW 时，Zn 通过工具旋转从中心向外周排出，因此大部分 Zn 从焊接中心区排出，而焊接端部则残留有较多 Zn。加压时间越短，Zn 越容易在中心和端部的焊接中间区域排出。

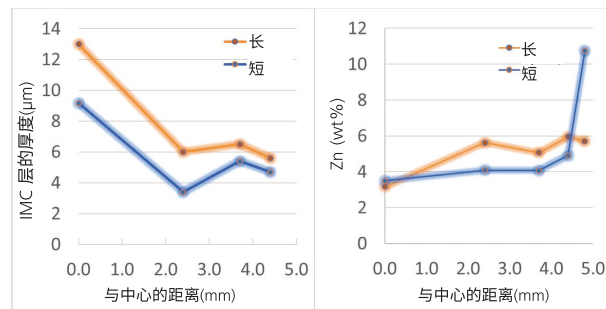


图 6 IMC 层的膜厚

图 7 Zn 平均浓度

焊接界面存在裂纹，测量了其面积比。图 8 所示为裁切裂纹区域周围的 COMPO 图像，显示了颜色渐变及其面积比。裂纹区域显示为黑色，如图 8 所示，根据焊接条件和与中心距离的不同，在 COMPO 图像中测量了黑色区域的面积比，其结果如图 9 (-R 表示从中心向右侧，-L 表示从中心向左侧) 所示。可以看出，当加压时间较长时，中心与端部之间的焊接中间区域内裂纹比例较多。

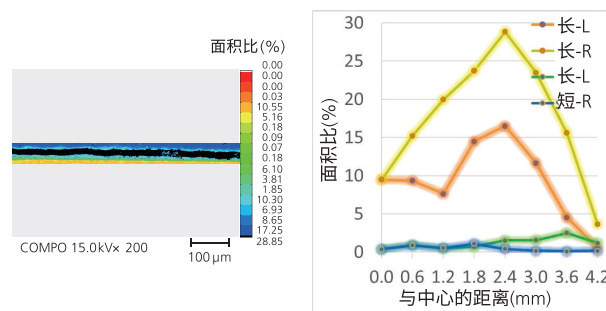


图 8 面积比

图 9 裂纹比例

■ 结论

根据 X 射线 CT 系统的截面图像，可以确认 Zn 向焊接区周围排出的情况。通过参照 X 射线 CT 图像，可高效地确定 EPMA 截面观察位置。EPMA 分析表明，当 Zn 未充分排出时，IMC 层的膜厚变厚，同时裂纹量增多，更容易发生断裂。

< 参考文献 >

Materia, 第 53 卷第 12 号 (2014), Materia Japan
时未光著, FSW (摩擦搅拌焊接) 的基础与应用,
日刊工业新闻社 (2005)

岛津应用云



EPMA, inspeXio 和 SMX 是岛津制作所株式会社或其相关公司在日本及其他国家/地区的商标。



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: 2022 年 2 月