

### 特点描述

- ◆ 有助于研究分析焊接区的整体组成。
- ◆ 有助于研究分析与焊接强度相关的金属间化合物层膜厚和结构。

### 简介

摩擦搅拌焊接 (FSW: Friction Stir Welding) 是一种利用工具旋转产生的摩擦热固相焊接不同种类材料的方法, 除汽车之外, 还广泛应用于铁路车辆、航空器、船舶、土木工程建筑物、电气设备等多种领域, 旨在实现轻量化目标。近年来, 随着全球环保和节能需求增加, 对产品的轻量化和生产效率的要求在不断提升, 旨在优化焊接工艺和控制焊接区界面结构的各项研发正在有条不紊地开展。

此外, 还出现了摩擦搅拌点焊 (FSSW: Friction Stir Spot Welding), 这是一种利用与 FSW 相同的摩擦搅拌现象的点焊法, 已实际应用于汽车生产线。

本文将介绍使用电子探针显微分析仪 EPMA™ (EPMA-8050G) 分析摩擦搅拌点焊铝合金与镀锌钢板的焊接界面的示例。

### 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, 在排出焊接界面上镀层的同时, 钢板表面出现新的表面, 与氧化膜已被破坏的铝合金发生反应, 形成金属间化合物层, 完成焊接。FSSW 接头的中心具有一个按钮状的小孔, 孔周围形成焊接部, 凸肩外侧形成毛刺状的突出部分。

图 1 (下段为上段中央部位附近的放大图) 所示为 FSSW 铝合金与镀锌钢板后的截面 SEM 图像。可看出电镀层 (膜厚: 约 20 μm) 的锌 (Zn) 排出至铝合金的情况, 以及焊接界面连续形成数 μm 的金属间化合物层。特别是在焊接端部, 可明显看出随着 Zn 向铝合金内部扩散, 出现大理石纹理, 且在数百 μm 范围内出现裂纹。

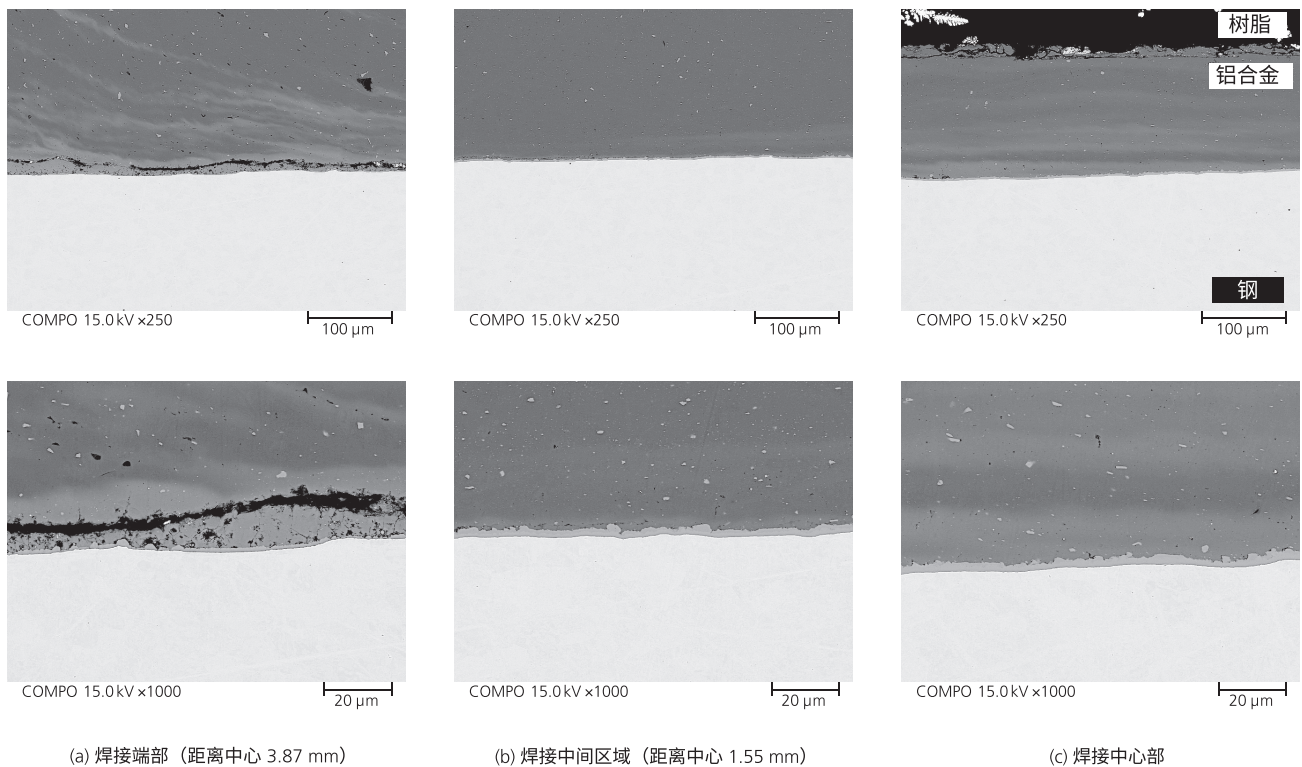


图 1 FSSW 截面的 SEM 图像

## 金属间化合物层的分析

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 层的中心部膜厚大于端部，厚度 1 μm 左右的 IMC 层均匀地在较大范围内形成时，焊接强度较高。

图 2 所示为焊接中心部，图 3 所示为中心与端部的焊接中间区域，图 4 所示为焊接端部的放大元素面分析图。焊接中心部与焊接中间区域由多个厚度为数 μm 的 IMC 层组成，镀层的 Zn 几乎全被去除。但是，焊接端部的镀层未被充分去除，难以形成新的表面，因此 IMC 层的膜厚变薄，产生裂纹。

图 5 所示为焊接中心部 IMC 层的放大面分布图像。可以看出，IMC 层共有 3 层（从钢板侧开始以 A、B、C 显示），A、B、C 各层的膜厚分别为约 0.4 μm、1.7 μm 和 0.7 μm。根据各层的 Al、Si、Fe、Zn 元素分布情况可识别不同的 IMC 层和相关元素，可看出残留有少量 Zn。

## 金属间化合物层的定量

表 1 所示为定量分析焊接中心部 IMC 层的结果。根据定量值，推测钢板侧 A 层由 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>（η 相）形成，中间 B 层由 FeAl<sub>3</sub>（θ 相）形成，铝合金侧 C 层的镀锌层 Zn 未去除，可以残存约 4 wt%。

表 1 IMC 层的定量分析结果

层\元素	(wt%)			
	Al	Si	Fe	Zn
IMC A 层	51.2	1.6	45.3	2.0
IMC B 层	58.5	1.3	38.7	1.5
IMC C 层	60.8	5.0	30.2	3.9

## 结论

通过对 FSSW 截面的分析，可从宏观方面考察接头和搅拌区等的组成变化，从微观方面可以考察 IMC 层的膜厚、元素分布和组成比，以确定研究与焊接强度之间的关系等。

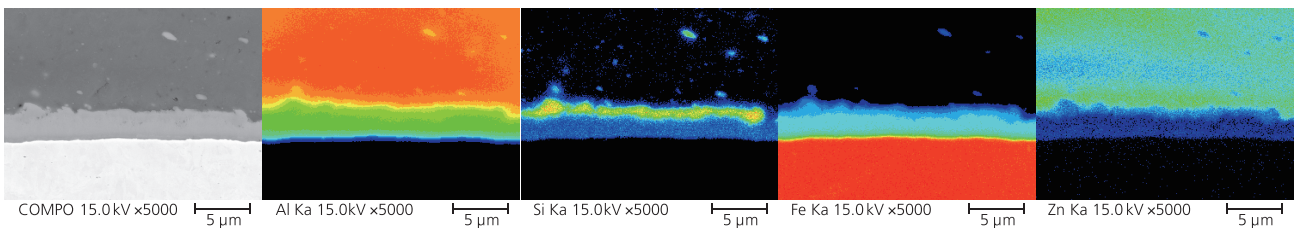


图 2 焊接中心部的元素面分析

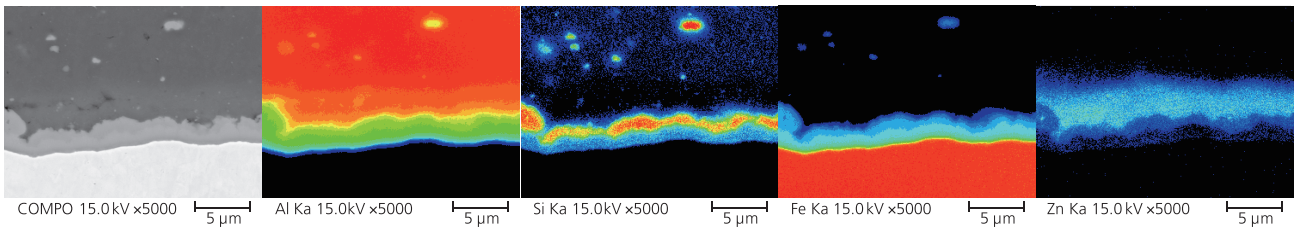


图 3 焊接中间区域（距离中心 1.56 mm）的元素面分析

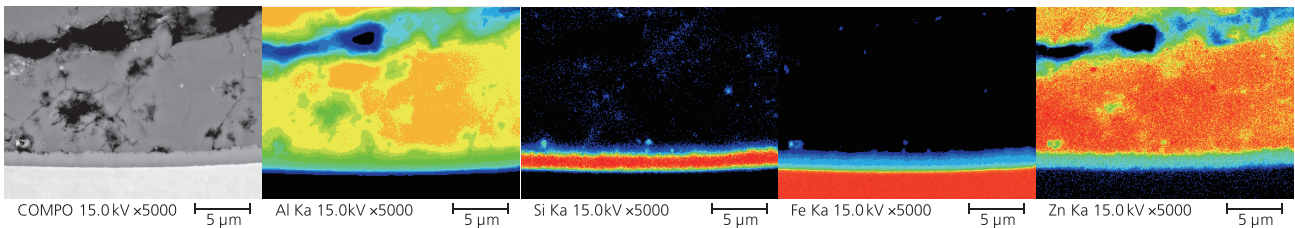


图 4 焊接端部（距离中心 3.87 mm）的元素面分析

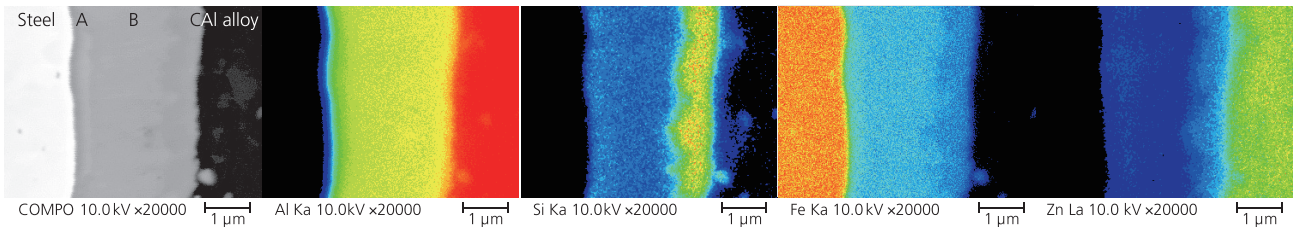


图 5 焊接中心部 IMC 层的元素面分析

### < 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 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：2021 年 9 月