

7005铝合金CMT、TIG和FSW焊接接头组织与性能对比研究

周青华, 刘州, 杜涛, 徐文玲, 许俊海

广汽埃安新能源汽车有限公司技术中心, 广东 广州
Email: zhouqh@gacne.com.cn

收稿日期: 2021年3月16日; 录用日期: 2021年4月5日; 发布日期: 2021年4月13日

摘要

分别对2 mm厚的7005铝合金进行冷金属过渡(Cold metal transition welding, CMT)焊、钨极惰性气体保护(Tungsten inert gas, TIG)焊与搅拌摩擦焊接(Friction stir welding, FSW), 对比分析了3种焊接工艺下接头的微观组织、力学性能和应力腐蚀性能。结果表明: 3种工艺都能获得无缺陷的接头。CMT和TIG焊核区晶粒粗大, FSW焊核区为等轴细晶; 常温拉伸试验中, FSW接头强度和塑性要优于CMT和TIG接头。CMT、TIG和FSW焊接样件ISSRT值分别为8.3%、9.2%和4.9%, 表明7005铝合金FSW焊接接头的应力腐蚀敏感性更低。

关键词

7005合金, CMT焊, TIG焊, 搅拌摩擦焊, 微观组织, 力学性能, 应力腐蚀

Microstructure and Properties of 7005 Aluminum Alloy Welded Joints by CMT, TIG and FSW

Qinghua Zhou, Zhou Liu, Tao Du, Wenling Xu, Junhai Xu

Guangzhou Automobile New Energy Automobile Co., Ltd. Technology Centre, Guangzhou Guangdong
Email: zhouqh@gacne.com.cn

Received: Mar. 16th, 2021; accepted: Apr. 5th, 2021; published: Apr. 13th, 2021

Abstract

2 mm thick 7005 aluminum alloy was subjected to cold metal transition welding (CMT), tungsten

文章引用: 周青华, 刘州, 杜涛, 徐文玲, 许俊海. 7005 铝合金 CMT、TIG 和 FSW 焊接接头组织与性能对比研究[J]. 材料科学, 2021, 11(4): 317-325. DOI: 10.12677/ms.2021.114038

inert gas welding (TIG) and friction stir welding (FSW), respectively. The microstructure mechanical properties and stress corrosion properties of the CMT, TIG and FSW joints were investigated. The results showed that defect-free joints for CMT, TIG and FSW were acquired. For the CMT and TIG joint, the nugget zone (NZ) was characterized with coarsened grains, for the FSW nugget, the NZs was characterized with equiax fine grains. The strength and plasticity of FSW joint is better than that of CMT joint and TIG joint. The stress corrosion sensitivity index of CMT, TIG and FSW welded samples are 8.3%, 9.2% and 4.9%, respectively, indicating that the stress corrosion susceptibility of 7005 aluminum alloy FSW welded joints is lower.

Keywords

7005 Aluminum Alloy, CMT Welding, TIG Welding, Friction Stir Welding, Microstructure, Mechanical Properties, Stress Corrosion

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

7×××系铝合金由于具有强度高、质量轻、易成型、导热性能良好等特点，被广泛应用于航空航天、汽车工业等领域中，尤其是作为承载的结构件[1]-[6]。无论是航空航天还是汽车工业中，在满足材料力学性能的前提下，减少承载的结构件的重量无疑是减少运输质量、提升运输速度的最佳方法之一。应用于航空航天或交通运输工业中的铝合金型材的轻量化也是减少燃料或能源消耗的常见方法。

然而，7×××系铝合金材料在服役过程中易发生腐蚀现象，特别是应力腐蚀，这也限制了7系铝合金材料的广泛应用。如何改善7×××系铝合金材料的腐蚀问题成为了当前研究的热点[7]-[15]。某新能源汽车电池包外壳体选用7×××系铝合金材料，其焊接的连接处无疑最可能产生应力腐蚀等腐蚀行为。常用的焊接方法有冷金属过渡焊(CMT) [16]和非熔化极惰性气体钨极保护焊(TIG) [17]和搅拌摩擦焊(FSW) [17]。不同焊接方式都会对7×××系铝合金材料的力学性能和腐蚀性能产生影响。因此，本文选取7×××系铝合金材料的焊接样件作为研究对象，探究其力学性能和腐蚀性能的差异性，为7×××系铝合金材料的工程应用提供参考。

2. 实验部分

2.1. 主要材料

本研究所使用的焊接母材为某铝业提供的厚度为2 mm的7005-T6铝合金挤压材；焊丝为某焊材公司提供的ER5356焊丝。焊接所用的母材以及焊丝的化学成分范围如表1所示。

Table 1. The chemical composition of the 7005 aluminum alloy and filler metal ER5356 (wt%)

表 1. 7005 铝合金和 ER5356 焊丝的化学成分

材料	Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Cr	Mn	Zr	Ti	Al
7005	<0.35	<0.40	<0.10	4.0~5.0	1.0~1.8	0.06~0.20	0.20~0.70	0.08~0.20	0.01~0.06	Bal.
ER5356	<0.25	<0.40	<0.10	<0.10	4.5~5.5	0.05~0.20	0.05~0.20	-	0.06~0.20	Bal.

2.2. 试验过程

本研究采用 CMT、TIG 和 FSW 焊共 3 种焊接工艺对 7005 铝合金材料进行对接焊接。焊接前先将 7005 铝合金试板洗净后立即烘干，烘干温度小于 90℃，时间大于 2 h。然后用丙酮将焊接坡口清洗干净，再用不锈钢刷打磨坡口及周围 35 mm 范围内试样表面，直至工件表面露出金属光泽。3 种焊接工艺的具体焊接参数如表 2~4 所示。

Table 2. Main parameters of CMT welding

表 2. CMT 焊接工艺参数

焊接电流, A	电弧电压, V	焊接速度, m/s	送丝速度, m/min	保护气体 Ar 流量, L·min ⁻¹
90~120	15~20	0.01	5~6	20~22

Table 3. Main parameters of TIG welding

表 3. TIG 焊接工艺参数

钨极直径, mm	起弧时间, s	焊接电流, A	焊接速度, m/s	保护气体 Ar 流量, L·min ⁻¹
2.5	1~2	250~280	0.008	14~16

Table 4. Main parameters of FSW welding

表 4. FSW 焊接工艺主要参数

搅拌头材质	轴肩尺寸	搅拌针类型	焊接转速, rad/min	焊接速度, m/min
H13 钢	15	锥形螺纹针	450	150

2.3. 测试方法

2.3.1. X 射线探伤

焊缝内部质量检测参照 Q/Y420-2011 标准进行,采用 GDT-XXG2005 型便携式 X 射线探伤机对 CMT、TIG 和 FSW 焊接接头的焊缝成形情况进行检测分析。

2.3.2. 微观显微测试

微观组织检测参照 GB/T 3246.1-2012 标准进行,沿焊接头的焊缝为中心,垂直于焊缝横向取样,经过粗磨、细磨和机械抛光后,用 Keller 腐蚀剂对测试样品腐蚀,腐蚀后用 Leica DM-4000M 金相显微镜对 FSW、CMT 和 TIG 焊接接头的微观特征进行观察。

2.3.3. 室温拉伸测试

拉伸性能检测参照 GB/T 2651-2008 进行,测试样品以焊接头的焊缝为中心,垂直于焊缝横向取样,具体规格如图 1 所示。拉伸试验开始前先对待测样品逐级打磨,洗净吹干,备用。然后采用 DDL-100 型电子万能试验机进行拉伸测试,试验所用的拉伸速率为 2 mm/min。样品断裂后立即洁净、密封保存。采用 ZEISS M10A 型扫描电子显微镜对断口进行观察。

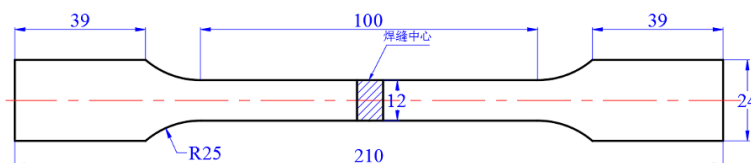


Figure 1. Dimensions of tensile specimens (unit: mm)

图 1. 拉伸试样尺寸图(单位: 毫米)

2.3.4. 应力腐蚀测试

应力腐蚀试验参照 GB/T 15970.7 和 HB 7235 标准进行, 测试样品以焊接头的焊缝为中心, 垂直于焊缝横向取样, 具体规格如图 2 所示。应力腐蚀试验开始前对待测样品逐级打磨, 洗净吹干备用; 随即采用 YYF-50 型应力腐蚀试验机进行应力腐蚀性能测试。试验条件分别为 3.5 wt% NaCl 和硅油溶液, 试验过程中温度控制在 $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

应力腐蚀试样安装完毕后, 先加载 100 N 进行预拉紧, 设置应变速率为 10^{-6} s^{-1} 进行各条件下的应力腐蚀试验, 利用计算机采集试验过程数据。焊接接头的应力腐蚀性能优劣定义了应力腐蚀敏感指数 (即 I_{SSRT}), 即可根据公式(1)获得。

$$I_{SSRT} = 1 - \frac{R_{m(\text{试验环境})} (1 + A_{(\text{试验环境})})}{R_{m(\text{惰性环境})} (1 + A_{(\text{惰性环境})})} \quad (1)$$

式中 $R_{m(\text{试验环境})}$ 、 $R_{m(\text{惰性环境})}$ 分别表示样品在试验环境和惰性环境的抗拉强度, MPa; $A_{(\text{试验环境})}$ 、 $A_{(\text{惰性环境})}$ 分别表示样品在试验环境和惰性环境的延伸率, %。 I_{SSRT} 从 0% → 100% 表示应力腐蚀敏感性的增加。样品断裂后立即洗净、密封保存。采用 ZEISS M10A 型扫描电子显微镜进行断口观察。

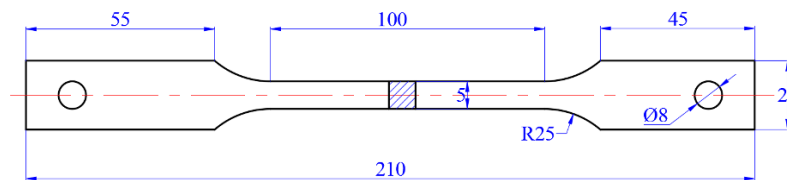


Figure 2. Dimensions of SSRT specimens (unit: mm)

图 2. 慢应变速率拉伸试样尺寸图(单位: 毫米)

3. 结果与讨论

3.1. 焊缝内部质量

图 3 所示为不同焊接方式(CMT、TIG 和 FSW)的焊缝 X 射线检测结果。从图 3 易看出, 3 种类型焊接接头的焊缝位置均呈现“白片”的现象, 表明 CMT、TIG 和 FSW 焊接接头的焊缝质量较好。对上述焊缝进行横截面的低倍观察, 结果如图 4 所示。从图中可以看出, CMT、TIG 和 FSW 焊接接头中母材区、热影响区(热-机影响区)和焊核区清晰可辨, 内部未发现未焊透、焊接裂纹、咬边、烧穿、焊瘤、气孔、凹陷和未熔合等焊接缺陷。进一步观察图 4 可知, FSW 焊缝与 CMT 和 TIG 焊缝存在一定差异, 焊缝截面存在着表层向底部延伸的“S 线”组织, 该特征组织为 FSW 工艺过程中, 由于焊缝区金属剧烈流变, 表面已有氧化层及焊缝中暴露的新金属表面迅速氧化而留下的富含 Al_2O_3 线型区的腐蚀痕迹。

3.2. 焊缝微观形貌

图 5 所示为不同焊接方式的焊接接头微观组织形貌照片, 其中(a)和(d)为 CMT 焊接头熔合区附近和焊缝区的金相显微组织, (b)和(e)分别为 TIG 焊接头熔合区附近和焊缝区的金相显微组织; (c)和(f)分别为 FSW 焊接头热机影响区附近和熔合区的金相显微组织。类比观察 CMT 和 TIG 焊接接头的金相显微组织可知, 两种焊接接头的焊缝区均存在着明显的等轴晶, 熔合线靠近焊缝一侧为粗大的柱状晶, 靠近母材一侧为等轴晶, 而 CMT 焊接接头的焊核区组织更为细小。这是由于 CMT 焊接整个过程中的焊接热输入较低, 焊核区组织不易结晶长大。而 CMT 焊接工艺中高效地冷却速度致使焊核区的过冷度明显增大, 焊缝的形核速率显著增加, 因此有效地抑制了焊核区晶粒的生长。此外, 观察图 4 还可以发现, FSW 焊接

接头的焊缝组织较 CMT 焊缝组织要更为细小, 这是在焊接热输入以及机械搅拌的双重作用下形成的, 焊核区组织达到再结晶温度后收到搅拌力的作用, 发生了再结晶现象, 细化焊缝的显微组织。而靠近 FSW 焊缝附近的热 - 机影响区组织由于搅拌过程产生的摩擦热低于 CMT 焊缝处, 使得晶粒长大不明显, 而受到搅拌力的作用, 该区域的晶粒取向在一定程度上发生了变化。通过对比不同焊接形式的焊核区的晶粒尺寸规格, 发现 FSW 焊接接头的焊核区尺寸明显小于 CMT 和 TIG 焊接方式的晶粒尺寸, 这将对 7005 铝合金的力学和腐蚀性能造成不同程度的影响。

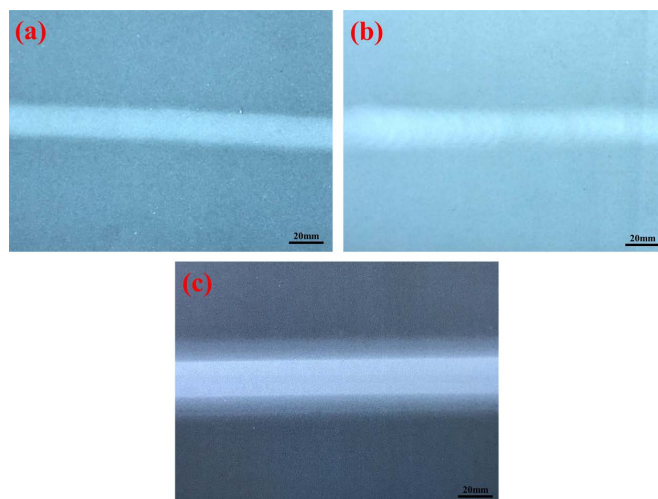


Figure 3. X-ray photos of welded joints: (a) CMT; (b) TIG; (c) FSW

图 3. 焊接接头的 X 光片: (a) CMT; (b) TIG; (c) FSW

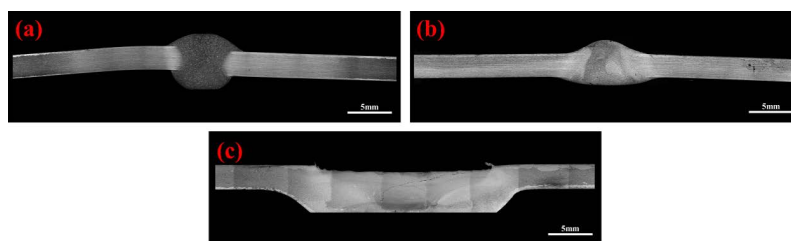


Figure 4. Macroscopic morphology of welded joints: (a) CMT; (b) TIG; (c) FSW

图 4. 焊接接头的宏观形貌: (a) CMT; (b) TIG; (c) FSW

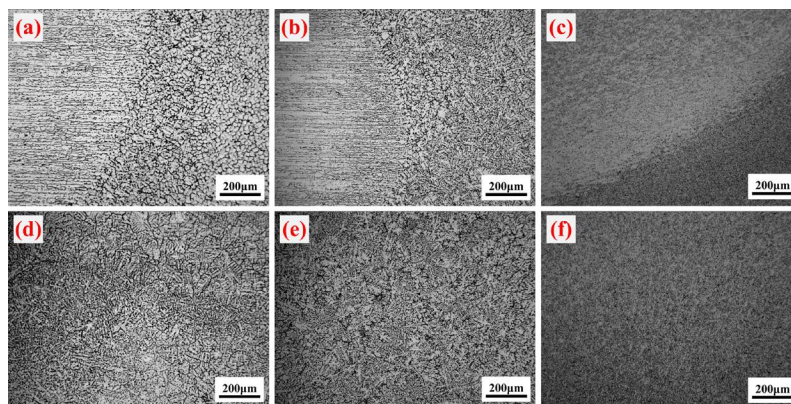


Figure 5. Microstructure of the weld joint by CMT, TIG and FSW

图 5. CMT、TIG 和 FSW 焊接接头金相组织

3.3. 室温拉伸性能

从 CMT、TIG 和 FSW 焊接试板上各切取 3 个拉伸试样进行室温拉伸试验, 表 5 所示为 CMT、TIG 以及 FSW 焊接样件的拉伸指标的平均值。从表 5 中可知, CMT 焊接接头平均抗拉强度为 304 MPa, 延伸率为 6.1%, 断裂位置位于 CMT 焊接样品的熔合区; TIG 焊接接头的平均抗拉强度为 301 MPa, 延伸率为 5.8%, 断裂位置位于 TIG 焊接样品的熔合区; 而 FSW 焊接接头的平均抗拉强度为 363 MPa, 延伸率为 8.7%, 断裂位置位于 FSW 焊接样品的热机影响区。由上述结果可知, 采用 FSW 焊接工艺可提升 7005 铝合金材料的连接性能。

对不同焊接方式的拉伸断口进行微观分析可知, FSW 焊接头的拉伸断口(图 6(c))存在明显的塑性变形, 断面上可见大量的韧窝, 这些韧窝的尺寸较为细小, 密度更高, 深度更深, 属于典型的韧性断裂。而对于 CMT 焊接拉伸断口而言, 韧窝数量明显少于 FSW 焊接拉伸断面, 断面上同时存着韧窝和小部分的解理台阶面, 断裂特征为混合型断裂特征, 而观察到图 6(b)可知, TIG 焊接拉伸断口的韧窝数量和深度进一步降低, 解理面的分布区域明显增大, 脆性断裂特征更为明显。上述 3 种焊接断口的形貌特征与拉伸结果的延伸率基本吻合。

Table 5. Tensile test results of welded joints

表 5. 焊接接头的拉伸试验结果

焊接方式	拉伸强度, MPa	延伸率, %	断裂位置
CMT	304	6.1	熔合区
TIG	302	5.8	熔合区
FSW	363	8.7	热机影响区

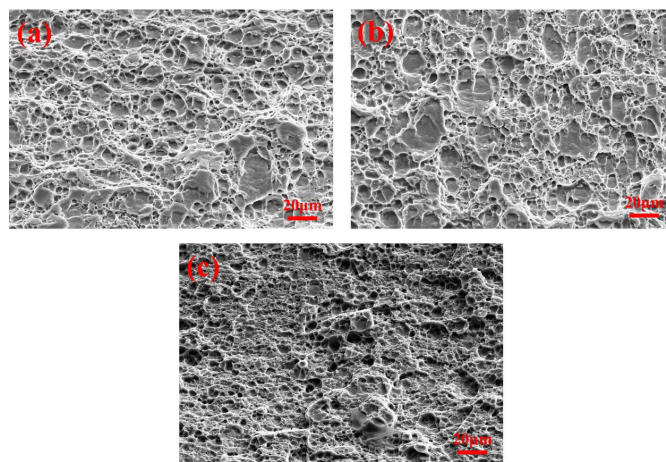


Figure 6. Morphologies of fracture surface of tensile specimen after different welding modes: (a) CMT; (b) TIG; (c) FSW

图 6. CMT、TIG 和 FSW 焊接件拉伸试样断口形貌: (a) CMT; (b) TIG; (c) FSW

3.4. 应力腐蚀性能

CMT、TIG 和 FSW 焊接接头的应力腐蚀试验分别在硅油(25℃)和 3.5 wt% NaCl 溶液(25℃)中进行, 试验结果如表 6 所示, 表中数据为 3~5 个平行试样的平均值, 已断裂在焊接部位的试样为有效试样。从表 6 中试验结果看出, 与硅油中的力学性能指标(拉伸强度和延伸率)相比, 3 种焊接接头样件在 3.5 wt%

NaCl 溶液中的力学性能指标均有所降低, 表明焊接件在 3.5 wt% NaCl 溶液中具有应力腐蚀敏感性。此外, 从表 6 还可以看出, TIG 焊接接头拉伸强度和延伸率在两种测试环境中的差值最大, 强度差为 24 MPa, 延伸率差为 0.7%。因此, 合金此状态下的应力腐蚀敏感性最强。根据表 6 的拉伸结果以及工艺(1), 计算得到焊接接头的 I_{SSRT} 值, 结果见表 6。从表 6 可知, 焊接方式的不同导致的 I_{SSRT} 值存在着明显的变化。FSW 焊接接头的 I_{SSRT} 值最小, 仅为 4.9%。

Table 6. Slow strain rate tensile test results for welded joints

表 6. 焊接接头的慢应变速率拉伸试验结果

焊接方式	试验条件	拉伸强度, MPa	延伸率, %	I_{SSRT} , %
CMT	硅油	287	6.3	8.3
	3.5 wt% NaCl	265	5.6	
TIG	硅油	281	5.4	9.2
	3.5 wt% NaCl	257	4.6	
FSW	硅油	357	8.6	4.9
	3.5 wt% NaCl	341	8.1	

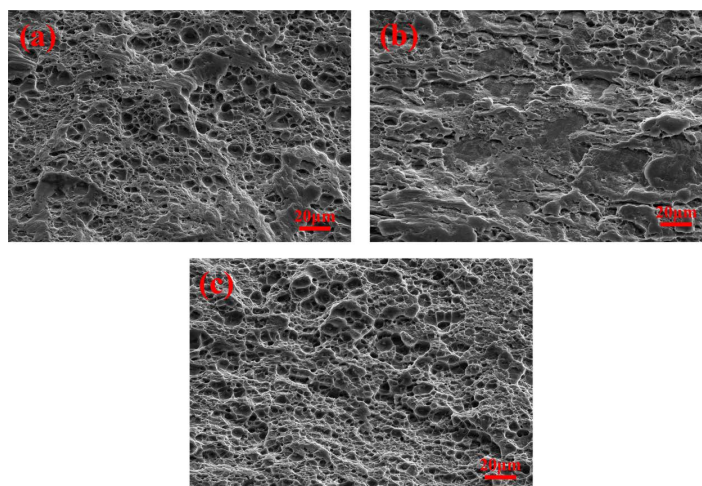


Figure 7. The slow tensile fracture morphology of the samples with silicon oil: (a) CMT; (b) TIG; (c) FSW

图 7. 试样在硅油溶液中的慢拉伸断口形貌: (a) CMT; (b) TIG; (c) FSW

图 7 为不同焊接方式的焊接试样在硅油溶液和 3.5 wt% NaCl 溶液中的断口形貌。观察图 7 可知, CMT 和 TIG 焊接接头拉伸断口形貌相似, 断面形貌平坦, 韧窝稀少, 在垂直于裂纹方向存在着一些解理台阶, 与 CMT 和 TIG 的室温拉伸断口形貌相似。进一步观察可知, TIG 焊接样品断口的层状分布区域明显高于 CMT 焊接样品, 这与硅油条件中的拉伸指标基本吻合。而 FSW 焊接接头断口面分布着很多大小不等的圆形或椭圆形的韧窝, 表明其断裂机制为韧性断裂。图 8 是 CMT、TIG 和 FSW 焊接接头试样在 3.5 wt% NaCl 溶液中的拉伸断口形貌。从图 8(a)可以看出, CMT 焊接样件的拉伸断面韧窝数量明显减少, 表面已覆盖了大量的腐蚀产物, 部分位置出现了沿晶开裂的二次裂纹。观察图 8(b)可知, TIG 焊接接头的断口面上腐蚀产物进一步增加, 断面几乎未见韧窝, 表明 TIG 焊接样品在 3.5 wt% NaCl 溶液中具有更高的应力腐蚀敏感性, 断口结果与其 I_{SSRT} 值吻合。而观察图 8(c)可知, FSW 焊接样件的断面韧窝数量减少, 部分位置出现了一些解理台阶, 但未见明显的腐蚀, 表明 FSW 焊接接头样品具有更好的抗应力腐蚀性能。

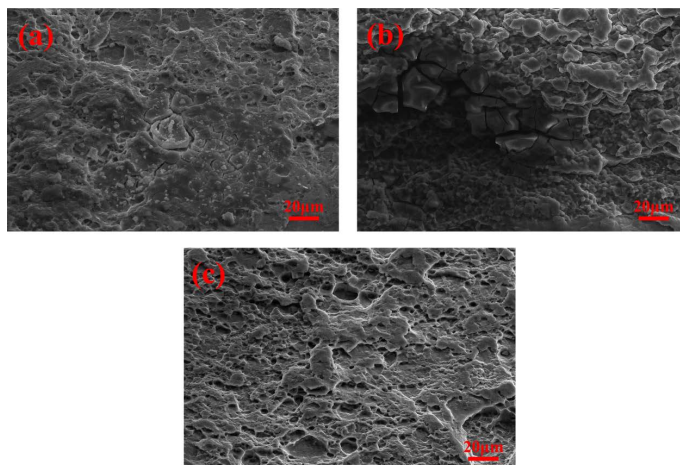


Figure 8. The slow tensile fracture morphology of the samples with 3.5 wt% NaCl solution: (a) CMT; (b) TIG; (c) FSW

图 8. 试样在 3.5 wt% NaCl 溶液中的慢拉伸断口形貌: (a) CMT; (b) TIG; (c) FSW

4. 结论

本文对 2 mm 厚 7005 铝合金进行了 CMT、TIG 与 FSW 焊接接头对比分析研究, 分析了 3 种焊接工艺的接头微观组织、力学性能和应力腐蚀性能, 主要结论如下:

1) CMT、TIG 和 FSW 焊接接头焊缝形成良好, 焊缝无缺陷。

2) 焊缝均为典型等轴状晶粒, 焊接接头熔合区靠近焊缝一侧为柱状晶组织, 靠近基体一侧为等轴晶组织。FSW 焊接接头的焊缝区晶粒尺寸小于 CMT 和 TIG 焊接接头。

3) CMT、TIG 和 FSW 焊接接头的平均抗拉强分别为 304 MPa、302 MPa 和 363 MPa, 试样断裂位置分别为焊接接头的熔合区、熔合区和热机影响区; FSW 焊接接头的拉伸强度优于 TIG 和 MIG 焊接接头。

4) 不同焊接方式的接头应力腐蚀性能存在着一定的差异, 其中 TIG 焊接接头的应力腐蚀敏感指数最高, I_{SSRT} 值为 9.2%; 而 FSW 焊接接头的应力腐蚀敏感指数最小, I_{SSRT} 值仅为 4.9%。

参考文献

- [1] 刘玉玲, 王晨, 张修庆. 热处理工艺对导电铝合金力学性能的影响[J]. 材料科学, 2019, 9(9): 854-860.
- [2] 孔亚非, 郭孝云, 和淑文, 等. 固溶处理对半固态 7075 铝合金浆料组织的影响[J]. 材料科学, 2016, 6(6): 322-328.
- [3] 蓝艳全, 杨昭, 林森, 等. Zn/Mg 比对 7003 铝合金挤压型材组织与性能的影响[J]. 材料科学, 2020, 10(1): 1-8.
- [4] 黄英, 邓运来, 陈龙, 等. 双级时效对 7N01 合金组织与性能的影响[J]. 材料科学, 2014, 4(3): 63-72.
- [5] 赵龙, 叶凌英, 邓运来, 等. 回归再时效温度对 Al-Zn-Mg 合金性能的影响[J]. 材料科学, 2018, 8(5): 617-624.
- [6] 商婷婷, 邓运来, 郭晓斌, 等. Cu 含量对 Al-5Zn-2.6Mg-xCu 合金组织和性能的影响[J]. 材料科学, 2020, 10(4): 238-247.
- [7] 王建军, 查小琴, 郑国华. 7xxx 系铝合金应力腐蚀开裂研究现状[J]. 轻合金加工技术, 2020(48): 9-15.
- [8] 李春岭. 7075 铝合金应力腐蚀开裂机理研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2014.
- [9] Zhang, Z., Deng, Y.L., Ye, L.Y., et al. (2020) Effect of Multi-Stage Aging Treatments on the Precipitation and Mechanical Properties of Al-Zn-Mg Alloys. *Materials Science & Engineering A*, **785**, Article ID: 139394. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139394>
- [10] Zhang, Z., Deng, Y.L., Ye, L.Y., et al. (2020) Influence of Aging Treatments on the Strength and Localized Corrosion Resistance of Aged Al-Zn-Mg-Cu Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **846**, Article ID: 156223. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156223>

-
- [11] 唐鸿远, 张臻, 邓运来, 等. 基于灰色系统理论的 Al-Zn-Mg 合金板材疲劳寿命预测[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(2): 228-232.
- [12] 吴建山, 邓运来, 张臻, 等. 加载方向对 Al-Zn-Mg 合金型材应力腐蚀开裂行为的影响[J]. 工程科学学报, 2019, 41(3): 350-358.
- [13] 张臻, 邓运来, 郭辉, 等. 应变速率对 Al-Zn-Mg 合金室温拉伸性能的影响[J]. 功能材料, 2017, 48(7): 7215-7220.
- [14] 罗先甫, 刘晓勇, 张文利, 等. 7020 铝合金在 Cl⁻环境下的应力腐蚀与局部腐蚀性能及其相关性分析[J]. 材料保护, 2021, 54(1): 57-62.
- [15] 杜娟, 李浩, 魏子明, 等. 慢应变速率拉伸下铝合金的缓蚀性能[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(2): 301-307.
- [16] 张满, 李年莲, 吕建强, 等. CMT 焊接技术的发展现状[J]. 焊接, 2010(12): 25-32.
- [17] 刘美娜. 新能源汽车电池包下壳体焊接工艺分析[J]. 生产现场, 2018(12): 37-42.