

引文格式: 马国龙, 韩晓辉, 林丹阳, 等. 不同轧制方向下高强铝合金 MIG 焊 T 形接头热裂纹及力学性能研究[J]. 焊接学报, 2026, 47(1): 117 – 125. MA Guolong, HAN Xiaohui, LIN Danyang, *et al.* Study on hot cracks and mechanical properties of MIG-welded T-joints of high-strength aluminum alloy under different rolling directions[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2026, 47(1): 117 – 125.



不同轧制方向下高强铝合金 MIG 焊 T 形接头热裂纹及力学性能研究

马国龙¹, 韩晓辉¹, 林丹阳^{2,3}, 吴来军^{2,3}, 王鹏¹, 宋晓国^{2,3}

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 技术工程部, 青岛, 266111; 2. 哈尔滨工业大学, 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 哈尔滨, 150001; 3. 哈尔滨工业大学(威海), 山东省特种焊接技术重点实验室, 威海, 264209)

摘要: 高铁运行速度的增加, 对高速列车车身焊接质量提出更高的要求. 文中系统研究了不同轧制方向的 Al-Zn-Mg 高强铝合金板材对于 MIG 焊 T 形接头热裂纹、微观组织和力学性能的影响. 结果表明, 当焊接方向与轧制方向平行时, 熔合区附近出现了异常长大的粗大晶粒. 位于晶界上的低熔点共晶相 Al(FeMnSi) 相与 MgZn 相在焊接过程中受热熔化形成液态薄膜, 随后由于焊接热应力作用形成液化裂纹. 液化裂纹普遍存在于熔合区中, 当焊接方向与轧制方向平行时, 熔合区中液化裂纹数量显著增加. 通过改变母材轧制方向, 液化裂纹数量明显降低, 焊接接头显微硬度、抗拉强度和断后伸长率获得提升, 分别达到 99.81HV、321.1MPa 和 37.7%; 拉伸试件断口呈现韧性脆性混合断裂特征.

创新点: (1) 研究了高铁用 Al-Zn-Mg 系铝合金中厚板 T 形接头微观组织及力学性能.
(2) 通过改变母材轧制方向实现了焊接接头热裂纹抑制.

关键词: MIG 焊; Al-Zn-Mg 系铝合金; T 形接头; 热裂纹; 液化裂纹

中图分类号: TG 422 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20241112001

Study on hot cracks and mechanical properties of MIG-welded T-joints of high-strength aluminum alloy under different rolling directions

MA Guolong¹, HAN Xiaohui¹, LIN Danyang^{2,3}, WU Laijun^{2,3}, WANG Peng¹, SONG Xiaoguo^{2,3}

(1. Technical Engineering Department, CRCC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, 266111, China; 2. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, 264209, China)

Abstract: As the operating speed of high-speed railways increases, higher requirements are imposed on the welding quality of high-speed train bodies. The influence of Al-Zn-Mg high-strength aluminum alloy plates with different rolling directions on the hot cracks, microstructure, and mechanical properties of MIG-welded T-joints was systematically studied. The research results show that when the welding direction is parallel to the rolling direction, abnormally grown coarse grains appear near the partial the fusion zone. The eutectic phases Al (FeMnSi) and MgZn with low melting points located on the grain boundaries are heated and melted to form a liquid film during the welding process, and then liquefaction cracks are formed due to the action of welding thermal stress. Liquefaction cracks are generally present in the partial the fusion zone. When the welding direction is parallel to the rolling direction, the number of medium and long liquefaction cracks in the partial the fusion zone significantly increases. By changing the rolling direction of the base material, the number of liquefaction cracks is significantly reduced, and the microhardness, tensile

strength, and elongation of the welded joint are improved, reaching 99.81 HV, 321.1 MPa, and 37.7%, respectively. The tensile specimen shows the characteristics of both tough and brittle fractures.

Highlights: (1) The microstructure and mechanical properties of T-joints of medium-thick plates of Al-Zn-Mg aluminum alloy for high-speed railways were studied.

(2) Hot cracks in welded joints were suppressed by changing the rolling direction of the base material.

Key words: MIG welding; Al-Zn-Mg aluminum alloy; T-joint; hot cracks; liquation crack

0 序言

随着高铁运营速度等级不断提高,对材料轻量化需求及焊接质量提出更高的要求^[1-2]. Al-Zn-Mg 系铝合金以其较低的密度、较高的比强度及比刚度、良好的耐蚀性和可加工性、高导电性和导热性,在高速列车中得到了广泛的应用^[3-5]. Al-Zn-Mg 系铝合金作为可热处理强化铝合金常应用于高速列车板梁结构^[6]. 然而,由于 Al-Zn-Mg 系铝合金复杂的元素组成与独特的物理性质,其合金化程度高、结晶温度范围宽、线收缩系数大、固液区塑性低和凝固末期的补缩,因此焊接性能差,焊接接头往往存在气孔、夹杂等缺陷,而且其热裂纹倾向较大,这不但降低了铝合金构件的使用寿命,影响铝合金结构的使用性能与承载能力^[7-8]. 其中,焊接热裂纹是导致接头失效的危害性较大的缺陷. 因此,开展 Al-Zn-Mg 系高强铝合金热裂纹研究,揭示液化裂纹影响因素及抑制方法具有重要的理论意义与实用价值.

在熔化焊接过程中,熔合区存在一种晶界液化现象,即位于熔合区晶界上的低熔点共晶相会发生熔化而晶粒整体并未熔化. 在焊接应力的作用下,存在低熔点共晶相的晶界优先开裂并沿晶界扩展,这种情况下形成的裂纹被称为液化裂纹^[9-10]. 董未科等人^[11]在较早时便开展了铝合金 MIG 焊接接头热影响区晶界液化的机理研究,研究指出,在焊接过程中,当熔合区中的温度高于低熔点共晶转变温度时,在晶界处就会产生明显的晶界液化现象. 目前在国内外对于液化裂纹的研究中,将液化裂纹的影响因素归结于原始组织、合金元素和焊接热输入 3 方面. 在原始组织方面, KHALIL 等人^[12]的研究发现晶粒组织的尺寸对液化裂纹具有很强的影响效果,主要表现为晶粒较小时可以减小脆弱区的尺寸从而抑制液化裂纹. 此外,晶粒形式也对液化裂纹存在较大影响,在凝固过程中等轴晶组织能够更

加均匀分配未凝固的液态金属,且等轴晶细化后具有更强的抗裂效果. 郝玉喜等人^[13]研究了铝合金型材在挤压制备过程中形成的表面粗晶层对液化裂纹的影响,观察到液化裂纹起始于型材内表面粗晶区,沿晶界分布并向母材内侧扩展. 该现象主要由于粗晶区晶界相对平直,焊接热循环导致的组织改变使得裂纹不断沿晶界扩展,扩展至细晶区时晶界变多而曲折,液化裂纹的扩展被抑制. 在合金元素方面,由于液化裂纹往往起源于由低熔点共晶物组成的晶间液膜,其主要原因是部分合金元素扩大了液化区的温度范围,从而使得液化裂纹敏感性升高. NIE 等人^[14]利用脉冲 MIG 焊的方式获得了 6061 与 A356 铝合金的异种焊接接头,并分析了熔合区的裂纹缺陷与元素分布. 结果发现,在 A356 铝合金一侧的 Mg、Si 元素大量偏析,形成的低熔点共晶体是导致液化裂纹形成的重要原因. 此外,焊接过程中的热输入也是影响液化裂纹形成的主要因素,其影响机制可通过元素分布和残余应力两方面进行考虑. 一方面,焊接热输入影响着焊缝内合金元素的含量与分布. 合金元素的蒸发、扩散和反扩散将改变其元素在焊缝内的分布状态,这会进一步导致凝固温度范围的扩大和热裂纹敏感性的提升^[15]. 另一方面,焊接速度也是影响凝固温度范围的因素之一^[16-17],对热裂纹也会产生一定的影响. ZHANG 等人^[17]发现随着焊接速度的增加, Mg 元素在焊缝中的浓度降低,改变了焊缝中的合金元素分布,提升了焊缝的裂纹敏感性. 除上述因素以外,目前最常用的铝合金板材在轧制过程中,内部晶粒会沿着轧制方向发生择优取向,形成明显的织构特征. 这种织构致使材料在不同方向上的力学性能、热物理性质产生各向异性. 热裂纹的形成机制与焊接过程中的应力应变分布息息相关,而板材各向异性必然导致焊接热循环下应力应变场的非均匀变化. 当焊接热输入引发熔池凝固收缩时,不同轧制方向上的拘束程度不同,晶体生长方向与应力方向的相对关系也随之改变,进而干扰枝晶间

液态金属的补缩过程,从本质上影响热裂纹的敏感性.

过往研究多聚焦于焊接工艺参数、材料成分等对高强铝合金焊接热裂纹的作用,针对铝合金板材轧制方向的探讨相对匮乏.考虑到实际工程构件形状复杂多样,焊接时板材拼接方向各异,若无法厘清轧制方向与热裂纹的内在联系,难以精准预测、防控热裂纹,这无疑会制约高强铝合金焊接技术在高端制造领域的进一步发展.所以,系统研究不同轧制方向下高强铝合金 MIG 焊 T 形接头热裂纹状况,极具现实紧迫性与科学必要性,是探索铝合金焊接质量提升路径的关键一环.因此,文中对于 Al-Zn-Mg 高强铝合金 MIG 多层多道焊 T 形焊接接头进行研究.在此基础上,为提升接头性能,开展了母材的不同轧制方向对于 T 形接头的缺陷、微观组织

和力学性能的研究,为抑制焊接接头液化裂纹提供研究数据和技术参考.

1 试验方法

试验材料选用通过轧制制备的 Al-Zn-Mg 铝合金中厚板.焊接填充材料选用直径为 1.2 mm 的 ER5356 焊丝,铝合金母材及焊丝的标准合金成分如表 1 所示.试验中的 T 形接头如图 1(a) 所示,其中立筋的尺寸为 200 mm × 150 mm × 12 mm,底板的尺寸为 200 mm × 200 mm × 12 mm,坡口形式及焊道布置,如图 1(b) 所示.焊前按照要求清理立筋及底板端面以去除油污及氧化膜.焊接方法采用 MIG 焊接,焊接模式采用直流脉冲模式,焊接工艺如表 2 所示,采用纯氩作为保护气,气体流量为 20 L/min.

表 1 铝合金母材及焊丝化学成分表 (质量分数, %)
Table 1 Compositions of aluminum alloy base metal and welding wire

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	V	Zr	Ti	Al
Al-Zn-Mg	0~0.30	0~0.35	0~0.20	0.20~0.70	1.0~2.0	0~0.30	4.00~5.00	0~0.1	0~0.25	0~0.2	余量
ER5356	0.13	0.12	0.01	0.05	4.9	0.07	0.13	—	—	0.11	余量

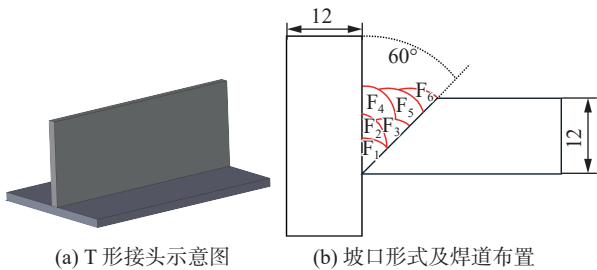


图 1 T 形接头示意图 (mm)
Fig. 1 Schematic diagram of T-joint and welding equipment. (a) T-joints; (b) welded joint form

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding process parameters

层道	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 v/(mm·s ⁻¹)
F ₁	215	23.0	7.0
F ₂	205	22.5	11.3
F ₃	207	22.0	10.6
F ₄	203	22.5	10.0
F ₅	205	22.5	13.5
F ₆	200	22.5	9.5

焊后使用线切割机沿垂直于焊缝轴线方向从焊缝上切取金相试样与拉伸试样,拉伸试样的选取位置和尺寸如图 2 所示.采用砂纸及抛光机对金相试样进行磨抛处理,随后采用化学试剂进行浸泡腐蚀 30 s,试剂成分为 95%H₂O + 2.5%HNO₃ + 1.5% HCl + 1%HF,腐蚀完成后,采用酒精将表面清洗干净并吹干.为对晶粒特征进行表征,将金相试样重新经过研磨抛光并清洗干净后,采用小功率恒压电源配以电解腐蚀溶液 (30% HClO₄ + 70% C₂H₅OH) 对试样表面进行电解抛光,电解时间为 30 s,电压为 20 V,温度保持为 -10 ℃.使用 OLYMPUS GX71 型金相显微镜观察金相组织;采用配备有电子背散射衍射 (electron back scatter diffraction, EBSD) 系统的 Zeiss MERLIN Compact 场发射扫描电子显微镜观察接头的晶粒组织、形貌、元素分布和断口形貌;使用 MICRO-586 型全自硬度测试仪进行维氏硬度的测量,试验采用加载载荷为 0.98N,加压时间为 15 s,相邻两点间隔距离为 1 mm;使用 UTM4204X 型电子万能试验机进行常温拉伸性能测试,拉伸速度设定 2 mm/min.

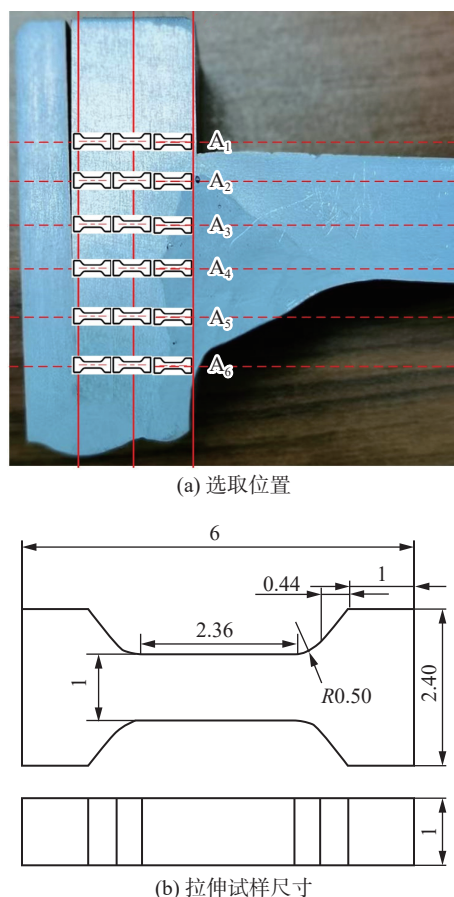


图 2 拉伸试样选取位置及尺寸 (mm)

Fig. 2 Location and size for selecting tensile specimens. (a) tensile specimen sampling location; (b) tensile specimen size

2 试验结果与分析

2.1 母材形貌分析

母材微观组织结构如图 3 所示, 标记点成分及可能相, 如表 3 所示. 发现在中心层存在大量的沿轧制方向链状密集分布的杂质相, 同时分布有部分大尺寸的杂质相, 而在上层和下层, 链状分布的杂质相数量明显减少, 通过表 3 中 EDS 分析判断其主要为 $\text{Al}(\text{FeMnSi})$ 相. 表面层和中心层的组织差异, 主要是成形过程中表面层受到剪切作用杂质相破碎变小并在表面高温作用下部分回溶, 中心层受

挤压作用导致杂质相 $\text{Al}(\text{FeMnSi})$ 沿轧制方向呈链状密集分布于晶间. 母材中存在亚稳态的 $\eta'(\text{MgZn})$ 相, 包括 MgZn 相和 Mg_2Zn 相等 Al-Zn-Mg 铝合金中常见的析出相, 这些析出相主要起到析出强化的作用. 母材中仅存在极少量分布在中心层的孔洞、裂纹等缺陷, 说明这些缺陷对后续的 T 形接头 MIG 焊产生的影响较小, 可不考虑.

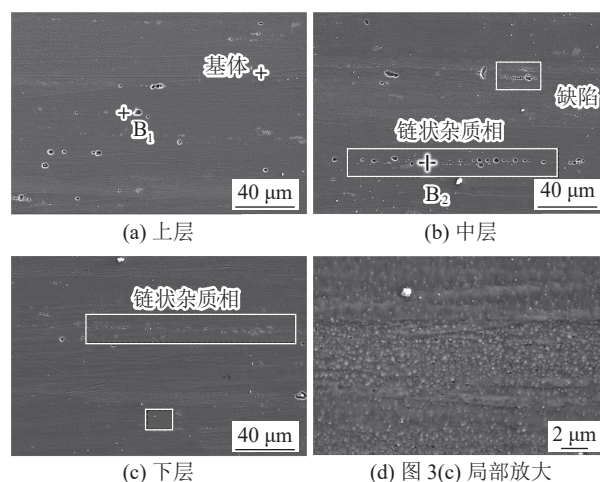


图 3 母材微观形貌

Fig. 3 Microscopic morphology of base metal. (a) upper layer; (b) middle layer; (c) lower layer; (d) Fig.3(c) enlarged

2.2 接头形貌分析

图 4 为当焊接方向与轧制方向平行时的焊接接头微观形貌, 图 5 为当焊接方向与轧制方向垂直时的焊接接头微观形貌. 焊接接头大致可分为焊缝区、熔合区、热影响区和母材 4 个区域. 焊缝区中心为典型的铸造组织, 存在大量随机分布的粗等轴晶粒. 从中心焊缝区到熔合线附近, 由于焊缝熔池被相对温度较低的母材包围, 熔池边缘和熔池中心的温差较大, 熔池的冷却速度很快, 这有利于柱状晶的生长, 因此, 图 4(d) 和图 5(d) 的焊缝中存在大量的柱状晶.

焊接方向与轧制方向垂直时的接头焊缝边缘细晶区与熔合区的宽度远大于焊接方向与轧制方向平行时的接头焊缝, 这可能与母材不同的晶粒组

表 3 图 3 中标记点成分及可能相 (原子分数, %)
Table 3 Compositions and possible phases of spots marked in Fig. 3

位置	Al	Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Cr	Mn	可能相
基体	95.52	1.33	2.20	0.21	0.16	0.35	0.23	—	$\alpha(\text{Al})$ 固溶体
B_1	88.88	5.65	3.82	0.70	0.16	0.50	0.29	—	$\eta'(\text{MgZn})$
B_2	88.36	1.31	2.72	0.11	1.82	4.26	0.22	1.20	$\text{Al}(\text{FeMnSi})$

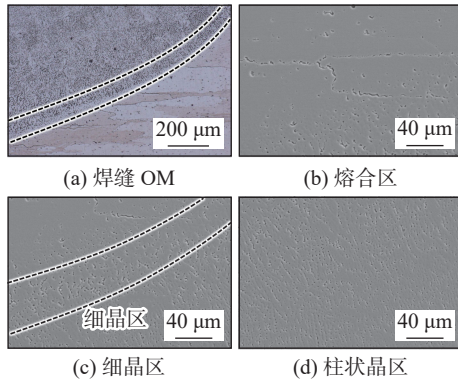


图 4 焊接方向与轧制方向平行的焊接接头微观形貌

Fig. 4 Microscopic morphology of welded joint with welding direction parallel to rolling direction. (a) weld OM; (b) fusion zone; (c) fine grain zone; (d) columnar grain zone

织所造成的差异有关. 熔合区中晶粒相对于母材出现一定程度的长大现象, 这是由于熔合区受热较大, 母材的轧制组织发生部分熔化. 相对于焊接方向与轧制方向平行时, 焊接方向与轧制方向垂直时的母材的晶粒为更加细长的呈择优取向的轧制典型带状纤维组织, 通过光镜观察初步发现垂直时的液化裂纹数量明显低于平行. 两种焊接方式下的焊接接头中均存在少量的气孔缺陷, 这是由于 Al-Zn-Mg 铝合金及 ER5356 焊丝含有 Mg 元素、Zn 元素等低熔点元素, 这些元素在多道焊焊接所产生的高热输入作用下容易发生气化产生气孔.

2.3 液化裂纹分析

液化裂纹是焊接过程中, 熔合区晶界上的低熔点相发生熔化, 而晶粒整体并未熔化, 在拉应力作用下晶界液化沿晶界开裂而产生的一种焊接热裂纹. 与凝固裂纹相比, 液化裂纹更加细小, 形状通常不规则. 为揭示焊接方向与轧制方向的相对变化对于液化裂纹的影响, 开展了对于两种焊接接头液化裂纹的数量分布、形貌及形成原因的研究.

当焊接方向与轧制方向平行时, 液化裂纹大量存在于焊接接头熔合区中, 且均为长裂纹, 长度可达 1~2 mm, 如图 6 所示. 根据接头形貌的研究表明, 熔合区存在异常长大的晶粒. 液化裂纹主要出现在这些异常长大晶粒的晶界处, 并沿晶界在多个晶粒之间拓展, 部份晶粒两侧均出现晶界液化的现象. 同时, 液化裂纹上存在少量的杂质相.

图 7 为液化裂纹处 EDS 面扫分析结果, 结果表明 Al 元素、Cr 元素、Cu 元素和 Si 元素 4 种元素分布较为均匀, 没有出现明显的富集或贫化现象; Fe

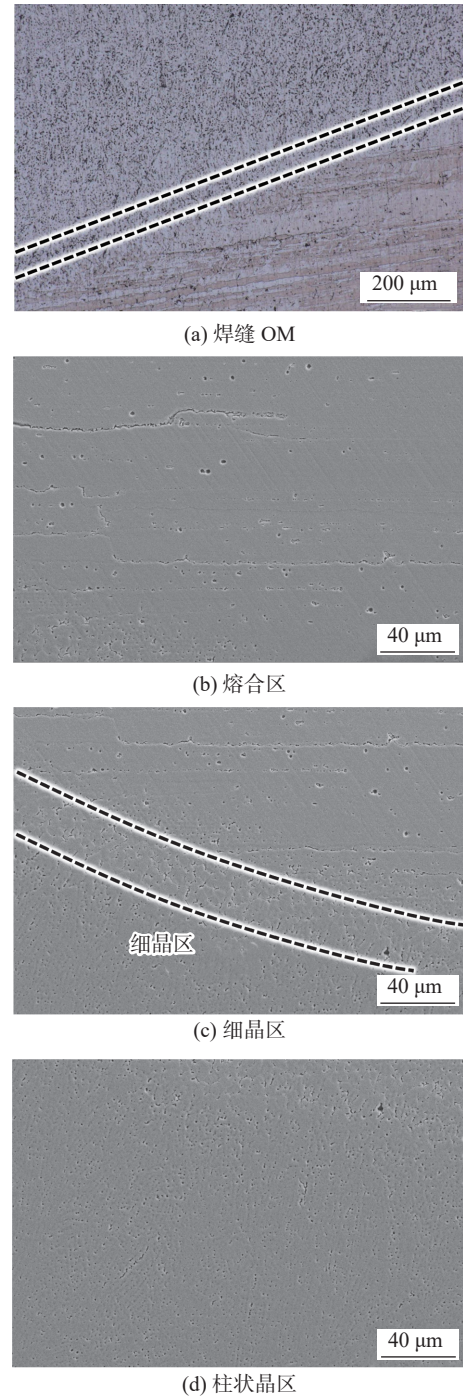


图 5 焊接方向与轧制方向垂直的接头微观形貌

Fig. 5 Microscopic morphology of welded joint with welding direction perpendicular to rolling direction. (a) weld OM; (b) fusion zone; (c) fine grain zone; (d) columnar grain zone

元素在裂纹附近区域出现部分富集分布, 作为杂质元素, Fe 元素在这些富集区域易形成杂质相, 结合表 4 的 EDS 分析认为, 这些相可能为 Al(FeMnSi) 相, 这些杂质相将成为应力集中区域或裂纹萌生处, 对 Al-Zn-Mg 铝合金 T 形接头性能产生不利的影响; Mg 元素和 Zn 元素在晶界处出现明显的富集现象, 结合胡亮等人^[18]的研究认为,

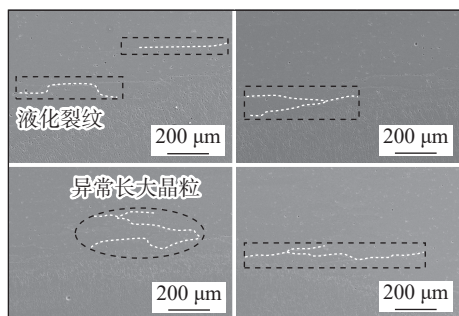


图 6 焊接方向与轧制方向平时液化裂纹

Fig. 6 Liquation cracks of the welding direction parallel to the rolling direction

Al-Zn-Mg 铝合金在晶界易形成 MgZn 与 AlMg_3Zn_3 相. $\text{Al}(\text{FeMnSi})$ 相, MgZn 相和 AlMg_3Zn_3 相的熔点均约为 $570 \sim 590^\circ\text{C}$, 低于 Al-Zn-Mg 系铝合金的熔点 (660°C), 属于低熔点共晶相. 在 Al-Zn-Mg 系铝合金 MIG 焊过程中, 熔池的温度能达到 1200°C , 远高于这些相的熔点, 这使得其在焊缝边缘的熔合区中发生熔化, 形成沿晶界分布的液态薄膜. 这些液态薄膜在受到焊接热应力的作用, 将萌生为沿晶界分布的液化裂纹. 这些大量存在的液化裂纹将严重影响焊接接头的质量和力学性能.

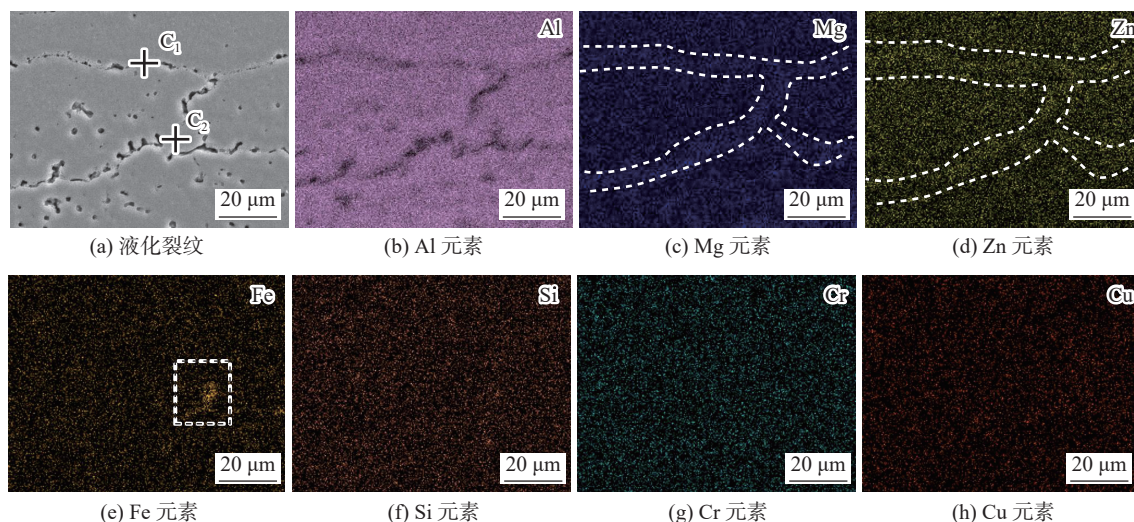


图 7 焊接方向与轧制方向平时液化裂纹位置 EDS 分析结果

Fig. 7 Results of EDS analysis of the liquation cracks when the welding direction is parallel to the rolling direction. (a) liquation cracks; (b) Al element; (c) Mg element; (d) Zn element; (e) Fe element; (f) Si element; (g) Cr element; (h) Cu element

表 4 图 7(a) 中标记点成分及可能相 (原子分数, %)

Table 4 Compositions and possible phases of spots marked in Fig. 7(a)

位置	Al	Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Cr	Mn	可能相
C ₁	93.75	2.62	2.46	0.69	0.01	0.29	0.18	—	MgZn
C ₂	84.30	1.96	6.97	0.35	2.78	2.20	0.37	1.07	$\text{Al}(\text{FeMnSi})$

当焊接方向与轧制方向垂直时, 液化裂纹数量及长度明显降低, 呈现沿轧制方向平直分布的特征, 同时出现少量的短裂纹, 如图 8 所示. 液化裂纹仍然为沿晶扩展, 但连续存在于多个晶粒之间的裂纹数量明显降低, 这是由于此时母材中并不存在焊接方向与轧制方向平时出现的粗大晶粒. 图 9 为液化裂纹处 EDS 面扫描分析结果, 与之前不同的是 Zn 元素的富集现象明显降低, Fe 元素、Si 元素两种元素沿裂纹出现的富集现象增多. 此外, Mg 元素仍然沿晶界出现大量的富集, 但在晶粒上侧出现

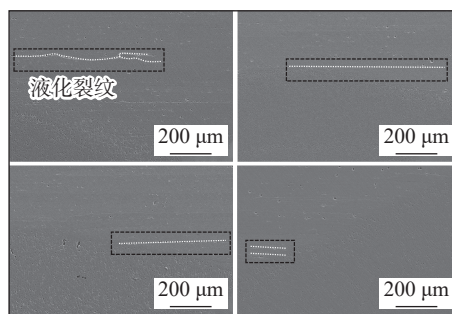


图 8 焊接方向与轧制方向垂直时液化裂纹

Fig. 8 Liquation cracks of the welding direction perpendicular to the rolling direction

了裂纹,下侧并未出现裂纹,同时下侧并未存在 Fe 元素、Si 元素、Cu 元素和 Cr 元素的富集,这表

明液化裂纹的萌生与 $MgZn$ 相和 $Al(FeMnSi)$ 两者同时存在关系.

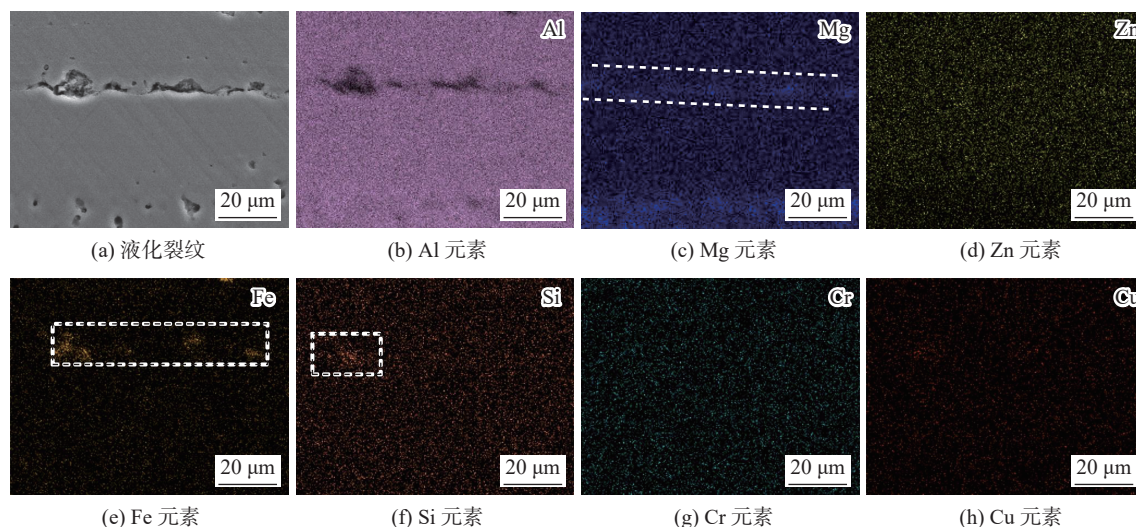


图 9 焊接方向与轧制方向垂直时液化裂纹位置 EDS 分析结果

Fig. 9 Results of EDS analysis of the liquation cracks when the welding direction is perpendicular to the rolling direction. (a) liquation cracks; (b) Al element; (c) Mg element; (d) Zn element; (e) Fe element; (f) Si element; (g) Cr element; (h) Cu element

2.4 液化裂纹与晶粒形态的关系

为进一步揭示液化裂纹与晶粒形态的关系,我们对两种不同组对形式的焊接接头的部分熔化及热影响区进行了 EBSD 分析.如图 10 所示,当焊接方向与轧制方向平行时,熔合区晶粒大部分为取向相近的粗大晶粒,最大尺寸可达 $400\ \mu m$.图 10(a)中黑色密集的区域为液化裂纹产生的位置,液化裂

纹普遍分布在大角度晶界,且位于取向差较大的晶粒之间,晶粒两侧均存在液化裂纹.当焊接方向与轧制方向垂直时,晶粒为轧制板材中典型的带状纤维组织,晶粒尺寸相对于平行时显著减小,但长度较大.图 10(b)中黑色的液化裂纹区域相对于平行时宽度更小,数量更少,但分布位置变化较小,仍然位于大角度晶界处与大取向差晶粒之间. EBSD 分析表明母材的晶粒形态与液化裂纹的萌生存在关系,小的晶粒尺寸有助于抑制液化裂纹萌生,而粗大的晶粒将增大液化裂纹的宽度与数量.

2.5 接头力学性能分析

对两种组对形式焊接接头的显微硬度进行测试,显微硬度测试结果如图 11 所示,两种焊接接头的显微硬度都呈现上下波动的区域,这是由于测试区域同时包含了母材、热影响区、熔合区和焊缝.当测试区域接近于熔合区时,熔合区中存在液化裂纹和粗大晶粒使得显微硬度显著降低.焊接方向与轧制方向垂直时的平均维氏硬度为 $99.81\ HV$,而平行时平均硬度为 $96.94\ HV$,当测试区域位于焊缝时由于焊丝种类和焊接工艺相同,所以硬度测试值相近.但在熔合区两者的硬度差异最高可达 $12\ HV$,表明液化裂纹的存在会显著影响接头硬度.

拉伸性能测试结果如图 12 所示,当焊接方向与轧制方向垂直时,抗拉强度最高达到 $321.1\ MPa$,

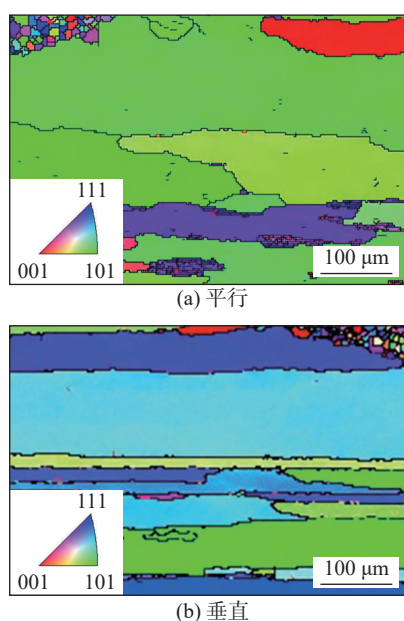


图 10 接头熔合区和热影响区晶粒形貌

Fig. 10 Grain morphology in the fusion zone and heat-affected zone of the joint. (a) parallel; (b) perpendicular

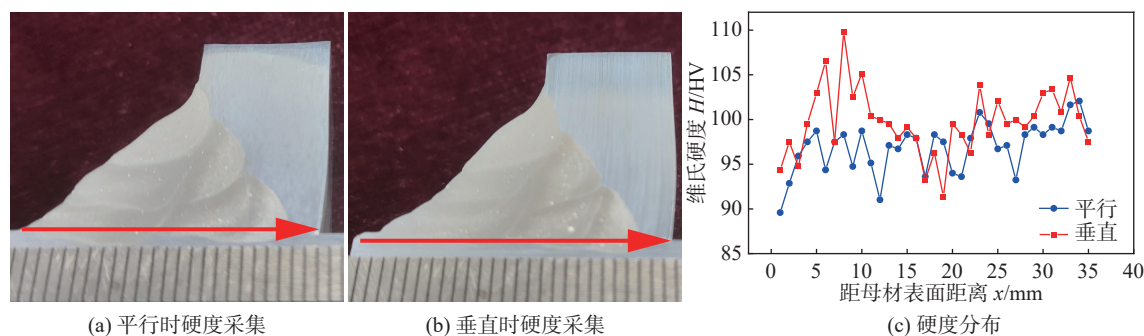


图 11 两种焊接接头维氏硬度分布

Fig. 11 Vickers hardness distribution of two types of welded joints. (a) hardness measurement when parallel; (b) hardness measurement when perpendicular; (c) hardness distribution

平均抗拉强度为 310.13 MPa, 断后伸长率最高达到 37.7%, 平均断后伸长率为 33.83%; 当焊接方向与轧制方向平时, 抗拉强度最高达到 306.1 MPa, 断后伸长率最高达到 36.9%, 平均抗拉强度为 292.63 MPa, 平均断后伸长率为 32.5%. 无论是抗拉强度还是断后伸长率, 焊接方向与轧制方向垂直的接头性能均显著优于平行的接头。

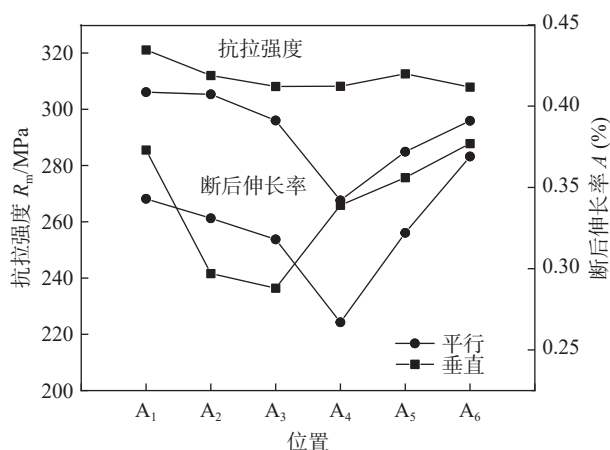


图 12 拉伸性能测试结果

Fig. 12 Test results of tensile properties

两种焊接接头拉伸件试样断口形貌如图 13 所示, 对于焊接方向与轧制方向平行的焊接接头拉伸件试样, 断口中韧窝数量较少, 出现阶梯状和撕裂, 呈现韧性和脆性混合的断裂特征. 断口处出现明显的液膜和杂质相, 韧窝底部弥散分布有大小不一的第二相颗粒. 这些液态薄膜即为在电弧热作用下晶粒边界发生高温熔蚀而更加圆滑, 同时晶界的低熔点相在电弧热作用下发生液化, 并以液态膜的形式覆盖在熔化的晶粒边界上. 杂质相分布在液化裂纹附近这也与之前 EDS 面扫测试结果相符. 在拉伸过程中, 拉伸件受到拉应力的作用, 液化裂纹逐渐沿晶界方向扩展, 由于平行的接头中液化裂纹多为

连续分布, 因此多条同时扩展液化裂纹相汇合使其快速发展为宏观裂纹, 导致拉伸件试样断裂. 对于垂直的接头由于液化裂纹的数量减少, 断口中韧窝数量有所增加, 接头的性能获得提升.

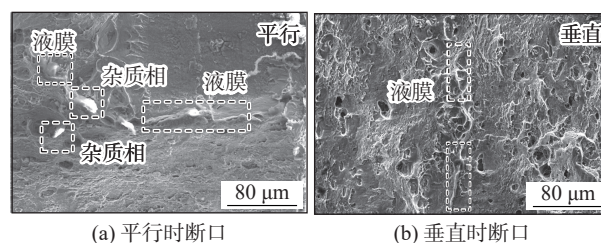


图 13 焊接接头拉伸件断口形貌

Fig. 13 Fracture morphology of tensile specimens of welded joints. (a) parallel; (b) perpendicular

3 结论

(1) 熔合区晶粒大小受到母材的晶粒形态的影响. 当焊接方向与轧制方向平时, 熔合区中出现了异常长大的粗大晶粒, 当焊接方向与轧制方向垂直时, 母材的带状纤维组织能够抑制晶粒的异常长大.

(2) 对于 Al-Zn-Mg 铝合金 MIG 焊 T 形接头, 低熔点共晶相 $\text{Al}(\text{FeMnSi})$ 相与 MgZn 相分布在晶界位置, 焊接过程中由于低熔点共晶相熔化与焊接热应力作用导致形成液化裂纹. 液化裂纹分布在熔合区晶粒晶界处, 呈现沿晶扩展特征.

(3) 液化裂纹与杂质相的存在是导致断裂的主要原因, 断口呈现韧性和脆性混合断裂特征.

(4) 通过改变母材轧制方向, 调控接头熔合区与热影响区晶粒组织, 获得细小的晶粒, 能够实现液化裂纹的抑制, 提升焊接接头力学性能.

参考文献

- [1] 路浩. 高速列车用厚板铝合金 CMT 焊接工艺 [J]. 焊接学报, 2015, 36(4): 75 – 78.
LU Hao. CMT welding process for thick-plate aluminum alloys used in high-speed trains[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(4): 75 – 78.
- [2] 王小伟, 张斌, 曾如川, 等. 铝合金 VPPAW 穿孔焊接匙孔闭合处的微观组织与力学性能 [J]. 焊接学报, 2024, 45(3): 1 – 6.
WANG Xiaowei, ZHANG Bin, ZENG Ruchuan, *et al.* Microstructure and mechanical properties of welds at keyhole closures in variable-polarity plasma arc welding of Al alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(3): 1 – 6.
- [3] 丁波, 杨尚磊, 田爱琴, 等. 高速列车用高强铝合金 T 型焊接接头组织与性能研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43(23): 29 – 31.
DING Bo, YANG Shanglei, TIAN Aiqin, *et al.* Microstructure and properties of high-strength aluminum alloy T-joint welds for high-speed trains[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(23): 29 – 31.
- [4] YE Z, ZHU H, WANG S, *et al.* Fabricate high-strength 7075 aluminum alloy joint through double pulse MIG welding process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 125: 512 – 522.
- [5] 杨阳, 李松梅, 贾雪娇, 等. 7000 系高强铝合金微观组织结构对应力腐蚀行为和机制影响的研究进展 [J]. 材料保护, 2024, 57(7): 165 – 180.
YANG Yang, LI Songmei, JIA Xuejiao, *et al.* Research progress on the influence of microstructure of 7000-series high-strength aluminum alloys on stress corrosion behavior and mechanism[J]. Materials Protection, 2024, 57(7): 165 – 180.
- [6] LI S, DONG H, WANG X, *et al.* Effect of repair welding on microstructure and mechanical properties of 7N01 aluminum alloy MIG welded joint[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 54: 80 – 88.
- [7] 金聪聪, 黄立兵, 黄文彬, 等. 新型铝合金 MIG 焊接头微观组织与力学性能 [J]. 焊接学报, 2024, 45(7): 74 – 82.
JIN Congcong, HUANG Libing, HUANG Wenbin, *et al.* Microstructure and mechanical properties of MIG welded joints in novel aluminum alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(7): 74 – 82.
- [8] AI Y W, YE C L, LIU J B, *et al.* Study on improvement of weld defect in oscillating laser welding of aluminum alloy T-joints assisted by solder patch[J/OL]. Optics & Laser Technology, 2024, 176: 110873. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110873>.
- [9] 彭言言, 吕晓春, 徐锴, 等. 液化裂纹敏感性评价试验方法综述 [J]. 电焊机, 2023, 53(1): 15 – 24.
PENG Yanyan, LYU Xiaochun, XU Kai, *et al.* Review on testing methods for evaluation of liquation crack sensitivity[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(1): 15 – 24.
- [10] 陈树君, 王宣, 袁涛, 等. 镁合金焊缝液化裂纹敏感性及其预测方法探究 [J]. 金属学报, 2018, 54(12): 1735 – 1744.
CHEN Shujun, WANG Xuan, YUAN Tao, *et al.* Investigation on liquation crack sensitivity and prediction methods of welded joints in magnesium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(12): 1735 – 1744.
- [11] 董未科. 7N01 铝合金焊接接头热影响区晶界液化的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
DONG Weike. Study on grain boundary liquation in heat-affected zone of 7N01 aluminum alloy welded joints[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [12] KHALIL A M, LOGINOVA I S, SOLONIN A N, *et al.* Controlling liquation behavior and solidification cracks by continuous laser melting process of AA-7075 aluminum alloy[J/OL]. Materials Letters, 2020, 277: 128364. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128364>
- [13] 郝玉喜, 徐伍刚, 徐玉君, 等. MIG 焊接工艺对 $6 \times \times \times$ 铝合金液化裂纹的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(8): 61 – 65.
HAO Yuxi, XU Wugang, XU Yujun, *et al.* Effect of MIG welding process on liquation cracks in 6xxx aluminum alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2020, 48(8): 61 – 65.
- [14] NIE F H, DONG H G, CHEN S, *et al.* Microstructure and mechanical properties of pulse MIG welded 6061/A356 aluminum alloy dissimilar butt joints[J]. Journal of materials science & technology, 2018, 34(3): 551 – 560.
- [15] CHEN Z, TAHERI M. The effect of pre-heating and pre-cold treatment on the formation of liquation and solidification cracks of nickel-based superalloy welded by laser beam[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 11162 – 11177.
- [16] WANG Y, LIN X, ZHAO Y, *et al.* Cracking mechanism and its susceptibility to scanning speed during laser power bed fusion processed high-strength 2024Al alloy[J/OL]. Materials Characterization, 2022, 194: 112344. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112344>.
- [17] ZHANG P, JIA Z, YU Z, *et al.* A review on the effect of laser pulse shaping on the microstructure and hot cracking behavior in the welding of alloys[J/OL]. Optics & Laser Technology, 2021, 140: 107094. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107094>.
- [18] 胡亮, 林森, 韩晓辉. 薄壁异质铝合金 MIG 角焊缝热裂纹萌生机理研究 [J]. 电焊机, 2024, 54(9): 38 – 46.
HU Liang, LIN Sen, HAN Xiaohui. Study on thermal crack initiation mechanism of MIG fillet welds in thin-walled dissimilar aluminum alloys[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(9): 38 – 46.

作者简介: 马国龙, 博士, 高级工程师; 主要从事轨道客车先进焊接技术开发及工程应用研究; Email: guolongma@163.com.
林丹阳 (通信作者), 博士, 副教授; Email: dylin@hit.edu.cn.