



等离子弧焊接铝合金厚板接头显微组织 与力学性能沿厚度方向的梯度特征

章朋田¹, 王小伟², 龚康¹, 仇恒毅¹, 姜楠¹, 隋彦涛³

(1. 中国空间技术研究院, 北京卫星制造厂有限公司, 北京, 100094; 2. 北京工业大学,
汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心, 北京, 100124; 3. 航天晨光股份有限公司, 南京, 211100)

摘要: 针对大厚度铝合金焊接接头强度不足的问题, 提出了变极性等离子弧-钨极氩弧焊 (variable polarity plasma arc-tungsten inert gas, VPPA-TIG) 复合焊接工艺. 为进一步验证 VPPA-TIG 复合焊的焊接质量, 开展了厚度为 17 mm 的 2219 铝合金板焊接试验, 详细研究了焊缝厚度方向上的显微组织和力学性能分布特征, 并通过显微组织分析揭示了强度分布特征的机理. 结果表明, VPPA-TIG 复合焊焊缝成形质量较好, 内部冶金程度较高. 焊缝熔合区硬度分布均匀, 平均值为 67.6 ± 2.7 HV0.2; 抗拉强度达到了母材的 62.83%, 而断后伸长率仅为 24.81%. 焊件厚度的增加扩大了熔池的散热面积, 造成焊缝晶粒生长不充分, 在界面区形成“蜿蜒”状微孔. 微孔在受到拉伸载荷作用时将会继续生长, 是影响焊缝拉伸强度的主要原因. 进一步拓展了 VPPA-TIG 复合焊工艺应用范围, 阐明了厚板焊接接头强度失效的机理, 为解决大厚度板材焊接提供理论和技术参考.

创新点: (1) 提出了铝合金厚板 VPPA-TIG 复合焊工艺.

(2) 阐明了铝合金厚板 VPPA-TIG 复合焊焊缝强度分布特征的机理.

关键词: 铝合金; 变极性等离子弧穿孔焊接; 大厚度板材; 力学性能; 显微组织.

中图分类号: TG 447 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20250217002

Microstructural and mechanical property gradients along the thickness direction of plasma arc welded thick aluminum alloy plate joints

ZHANG Pengtian¹, WANG Xiaowei², GONG Kang¹, ZHANG Hengyi¹, JIANG Nan¹, SUI Yantao³

(1. Beijing Spacecraft Manufacturing Co., Ltd, China Academy of Space Technology, Beijing, 100094, China;

2. Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Automotive Components, Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China; 3. Aerosun Corporation, Nanjing, 211100, China)

Abstract: To address the issue of insufficient strength in weld joints of thick aluminum alloys, a variable polarity plasma arc-tungsten inert gas (VPPA-TIG) composite welding process was proposed. The welding quality of VPPA-TIG composite welding was validated by conducting welding experiments on 2219 aluminum alloy plates with a thickness of 17 mm, followed by a detailed analysis of the weld microstructure and mechanical properties along the thickness direction. The mechanism of strength distribution characteristics was revealed by microstructure analysis. The results show that the VPPA-TIG composite welding process produces high-quality welds with a superior degree of metallurgical bonding. The hardness distribution in the weld fusion zone is uniform, with an average value of 67.6 ± 2.7 HV0.2. The tensile strength reaches 62.83% of the base material, while the elongation after fracture is only 24.8%. The increased thickness of the weldment expands the heat dissipation area of the molten pool, resulting in insufficient grain growth within the weld. This leads to the formation of “meandering” micropores in the interface region. These micropores will continue to grow when subjected to tensile loads, which is the main reason for affecting the tensile strength of the weld. This study further expands the application range of the VPPA-TIG composite welding, clarifies the mechanism of strength

failure in welded joints of thick plates, and provides a theoretical and technological reference for welding large-thickness plates.

Highlights: (1) A VPPA-TIG composite welding process for thick aluminum alloy plates was proposed.

(2) The microstructure and mechanical properties of the weld for thick aluminum alloy plates by VPPA-TIG composite welding were analyzed.

Key words: aluminum alloy; variable polarity plasma arc keyhole welding; large-thickness plate; mechanical property; microstructure.

0 序言

随着制造技术的发展,大厚度铝合金板被广泛应用于航空航天、重型车辆等领域承重结构部件^[1]. 铝合金密度低、耐腐蚀、导热性好,同等承载强度下,具有更小的自重. Al-Cu 铝合金不仅具有轻质、耐腐蚀、导热性好等特点,还具有较高的力学性能强度,是目前高强度重量比合金的典型代表^[2].

电弧焊因其操作简便以及工艺成熟等诸多优势,在加工制造领域广泛应用^[3]. 然而,传统电弧焊在焊接厚板时,焊接深度较为有限,往往会出现未焊透的问题. 为了解决这一难题,开坡口堆焊工艺和等离子弧工艺应运而生. 开坡口堆焊工艺借助机械加工在待焊位置预制出便于电弧进入的坡口,以弥补电弧熔覆深度不够的缺陷. 堆焊工艺虽然增大了电弧熔覆面积和焊接深度,但是往往会导致铝合金焊缝组织分层和层间区域气孔积聚^[4-5]. 等离子弧工艺通过喷嘴压缩电弧,具有较高的温度和能量密度,能够在极短的时间内将焊接材料熔化,然而,制成的铝合金焊缝断后伸长率较低,难以满足工程应用的使用要求^[6]. 为了弥补上述焊接方法的不足,陆续出现了针对厚板焊接的新工艺. 脉冲熔化极气体保护焊具有更大的焊接电流范围,可以有效控制焊接过程中液滴过渡、熔池尺寸和热量输入. 同时考虑到实际焊接过程中“一个脉冲一个熔滴”的实现难度,开发了双脉冲金属惰性气体保护焊用于焊接厚度为 10 mm 的铝合金板,获得了近乎无气孔缺陷的高质量焊缝. 由于较大的电弧作用面积,使摆动电弧窄间隙焊在窄间隙焊接中具有较高的使用率. NI 等人^[7]成功搭建了一套斜导电喷嘴的窄间隙熔化极气体保护焊焊接平台,发现摆动参数通过改变电弧能量分布影响焊缝几何尺寸的形成机理. 为进行厚板结构件焊接奠定技术基础. LIN 等人^[8]开发了等离子-MIG 复合焊,从组织与性能优化方面评估了该工艺在焊接厚度为 6 mm 的

铝合金板的可行性,系统研究了工艺参数的影响. FASIL 等人^[9]将 TIG-MIG 复合焊应用与低碳钢的焊接. 同时,磁场、超声振动等多种形式的外界能量场辅助焊接工艺用于铝合金中厚板焊接,通过优化能量场作用类型,提高焊缝质量^[10-11]. 此外,电弧的熔覆效果在焊接深度方向上存在显著差异^[12]. 特别是进行大厚度板焊接时,差异将会影响熔池金属的凝固过程,常表现出焊缝顶部与底部组织形貌差异和力学性能不稳定的特征,严重影响焊缝的连接质量,是当前大厚度板材焊接时面临的主要问题.

现有研究以小厚度铝合金板材焊接为主,对大厚度板材焊接研究相对匮乏,部分研究尚处于工艺参数探索与优化阶段. 文中在开发了 VPPA 熔穿打底-TIG 封层复合焊接工艺,并成功应用在厚度为 13 mm 的铝合金焊接加工的基础上. 设计了厚度为 17 mm 的铝合金焊接试验,详细研究了焊缝厚度方向上的力学性能的分布特征,显微组织分析揭示了力学性能分布特征的机理,为焊接大厚度铝合金提供理论参考.

1 试验方法

VPPA-TIG 复合焊示意图,如图 1 所示. VPPA 焊枪和 TIG 焊枪电弧电压和电流由两个焊接电源分别控制. 填充金属为商用 2319 铝合金焊丝,直径为 1.6 mm; 被焊金属为 2219 轧制态铝合金板,厚度为 17 mm. 焊丝与铝合金板化学成分,如表 1 所示. 焊接开始前先进行预试验,选择焊缝成形良好的参数. VPPA 和盖面焊 TIG 保护气流量均为 2 L/min(He) + 15 L/min(Ar),离子气流量为 3 L/min, EN 阶段电流为 320 A,持续时间为 15 μ s, EP 阶段电流为 350 A,持续时间为 5 μ s,打底焊的送丝速度为 1200 mm/min,盖面焊的送丝速度为 800 mm/min,焊接速度均为 125 mm/min. 为确保盖面焊缝的再热作用和密封性, TIG 采用直流电源模式,摆动幅度以熔覆宽度是打底焊缝的 1.2 倍为宜. 在施焊过

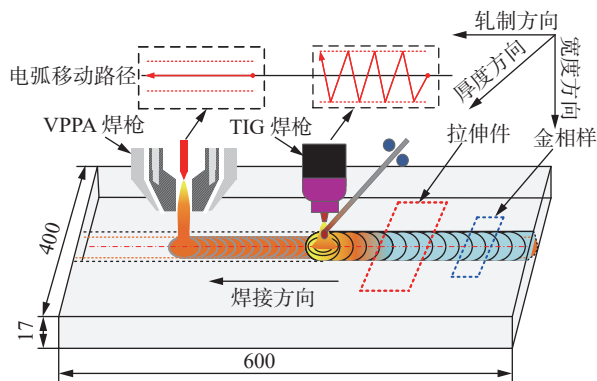


图 1 VPPA-TIG 复合焊示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic diagram of VPPA-TIG composite welding

表 1 铝合金板材和焊丝化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of aluminum alloy plate and welding wire

材料	Al	Cu	Si	Fe	Mn	Zr	Ti	Zn
2219	余量	6.00	0.20	0.30	0.20	0.10	0.02	0.10
ER2319	余量	5.80	0.20	0.30	0.30	0.10	0.10	0.10

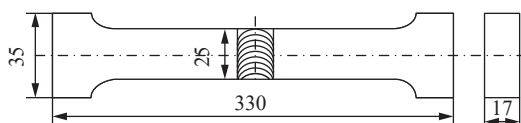


图 2 拉伸试样尺寸 (mm)

Fig. 2 Dimensions of tensile specimen

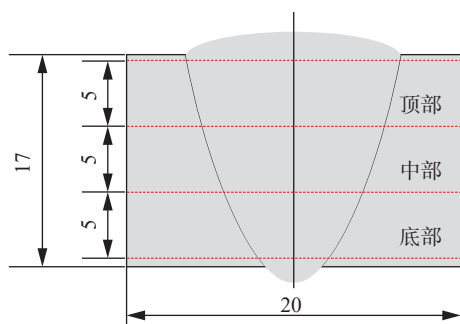


图 3 拉伸件试样切分示意图 (mm)

Fig. 3 Schematic diagram of slicing tensile specimen

显微组织观察试样经过金相磨抛机处理后, 使用凯乐试剂腐蚀 10 s, 分别置于光学显微镜和扫描电镜下观察. 背向散射电子衍射 (electron backscattered diffraction, EBSD) 试样用砂纸打磨并用粒径为 0.5 μm 的金刚石抛光至镜面后, 在液氮环境下电解抛光. 电压为 20 V, 电解时间为 20 s. 扫描步长为 0.2 μm . 为了确定焊缝断裂位置以及气孔缺陷情况, 观察了拉伸试样的断口和横截面形貌. 根据金属凝固理论, 揭示焊接工艺对成形件力学性能的影响.

程中, VPPA 在前制备打底焊缝, TIG 弧随后覆盖打底焊缝, 两者距离为 30 mm.

使用线切割设备以图 1 中焊缝为中心线分别截取拉伸件和金相试样. 拉伸试样尺寸, 如图 2 所示. 为了确定焊缝在厚度方向拉伸性能差异, 以研究焊接厚度对接头强度的影响, 进一步将拉伸试样切分成 3 个厚度为 5 mm 拉伸件试样切片, 如图 3 所示. 拉伸试验在万能电子拉伸试验机上进行, 速率为 1 mm/min; 转塔式显微硬度仪用来检测焊缝横截面硬度分布, 相邻硬度点间距为 0.4 mm, 载荷为 1.96 N, 加载时间为 10 s.

2 试验结果与分析

2.1 焊缝成形质量

焊缝的成形质量是评价焊接工艺优劣的重要指标. 采用 VPPA-TIG 盖面复合工艺焊接厚度为 17 mm 的 2219 铝合金焊缝的正面和背面的形貌, 如图 4 所示. 当前工艺参数条件下, VPPA 作为打底焊熔透能力良好, 较好实现了单面焊的双面成形, 焊缝背面的均匀性较高, 没有咬边等缺陷.

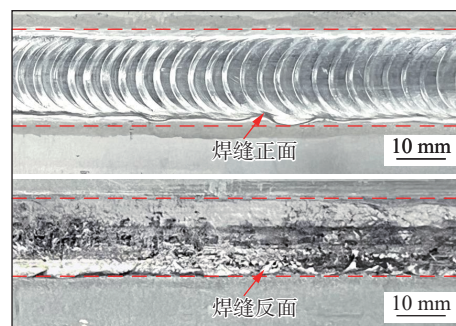


图 4 焊缝宏观形貌

Fig. 4 Macroscopic morphology of weld seams

通过焊缝正面的形貌可以看出, TIG 弧充分覆盖了打底焊的上表面, 呈现均匀的“鱼鳞”状. 上述焊缝形貌特征表明采用 VPPA-TIG 盖面复合工艺成功实现了大厚度铝合金焊接, 焊缝成形良好. 基于焊缝良好的成形, 开展了拉伸性能测试, 以验证

力学性能满足使用要求。

2.2 焊缝力学性能

焊缝和焊缝切片拉伸试样断后形貌, 如图 5 所示。分别测量了母材、焊缝及焊缝切片的拉伸性能, 结果如表 2 所示。母材的抗拉强度和屈服强度分别为 $452 \text{ MPa} \pm 0.82 \text{ MPa}$, $370 \text{ MPa} \pm 1.41 \text{ MPa}$, 断后伸长率为 $13.3\% \pm 1.3\%$ 。然而, 焊缝的抗拉强度和屈服强度分别为 $284 \text{ MPa} \pm 2.1 \text{ MPa}$, $110 \text{ MPa} \pm 1.45 \text{ MPa}$, 断后伸长率仅为 $3.3\% \pm 0.2\%$ 。对比来看焊缝的拉伸性能低于母材, 尤其是断后伸长率, 抗拉强度达到母材的 62.83%, 而断后伸长率仅为 24.81%。进一步测量了焊缝厚度方向切片的拉伸性能。从统计结果可以看出, 切片的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率并未表现出明显差异, 大小基本相当。切片的断后伸长率与焊缝大小相当, 而抗拉强度低于焊缝 9.8%, 屈服强度高出焊缝 7.4%。一般而言, 均匀材料的拉伸性能不会因尺寸变化而存在差异。因此通过焊缝与焊缝切片性能差异可推断出焊缝内部存在影响其连接强度的缺陷, 且缺陷对焊缝强度的影响效果受截面积的影响。



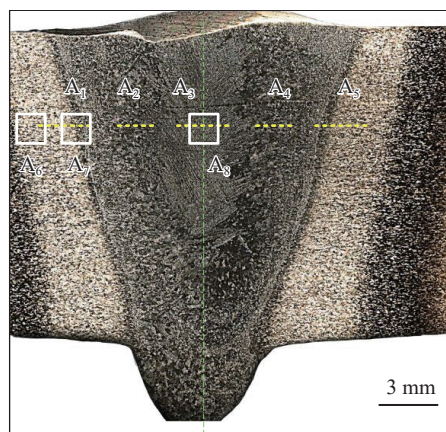
图 5 焊缝和焊缝切片拉伸试样
Fig. 5 Weld and welds slices specimens

表 2 焊缝及焊缝切片拉伸性能
Table 2 Tensile properties of welds and welds slices

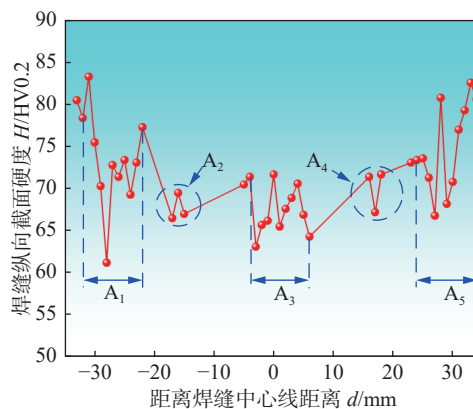
试样位置	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 R_{eL}/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
母材	452.0 ± 0.82	370.0 ± 1.41	13.3 ± 1.30
焊缝	284.0 ± 2.10	110.0 ± 1.45	3.3 ± 0.20
焊缝顶部切片	260.7 ± 2.05	111.7 ± 1.70	3.3 ± 0.41
焊缝中部切片	250.7 ± 4.03	123.0 ± 18.38	3.2 ± 1.65
焊缝低部切片	256.7 ± 2.05	119.7 ± 1.70	3.3 ± 0.41

通过焊缝横截面硬度分布情况, 可以评估力学性能均匀情况。沿着焊缝横截面的水平方向一条直线进行了硬度测量试验, 测量范围涵盖了焊缝热影

响区和熔合区, 焊缝纵向截面硬度分布, 如图 6 所示。焊缝左右两侧的硬度值基本关于焊缝中心线对称分布, 呈现“U”形的分布特征。图 6(a) 中标记的 A_1 区和 A_5 区分别为焊缝两侧热影响区。考虑到焊缝熔合区宽度较大, 从焊缝熔合区域选择了 A_2 区、 A_3 区和 A_4 区, 3 个典型区域进行硬度测量。对比这些区域的硬度值可以看出, 在熔合区加热作用下, 热影响硬度明显升高。测量熔合区 3 处硬度值基本相等, 这可以说明熔合区力学性能较为均匀。焊缝熔合区硬度分布均匀, 平均值为 $67.6 \text{ HV}0.2 \pm 2.7 \text{ HV}0.2$ 。焊缝区硬度分布均匀似乎和切片拉伸性能稳定相对应, 然而, 这与焊缝抗拉强度高于切片试验结果相矛盾。为了探明原因, 有必要分析显微组织。



(a) 焊缝纵向截面



(b) 硬度分布曲线

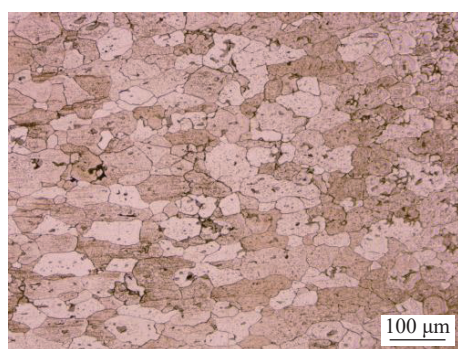
图 6 焊缝纵向截面硬度分布

Fig. 6 Hardness distribution of longitudinal section of weld seam. (a) longitudinal section of weld seam; (b) hardness distribution curve

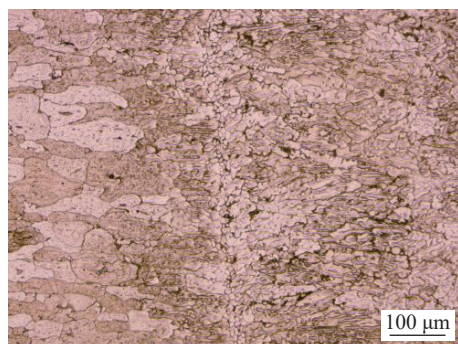
2.3 焊缝组织分析

首先采用金相显微镜观察了焊缝纵向截面形貌, 如图 6(a) 所示, 连接件焊缝区液态金属填充度较高, 轮廓线呈标准的圆弧状; 横向截面没有裂纹、气孔等焊接缺陷, 说明焊缝熔合质量较高。图 6(a)

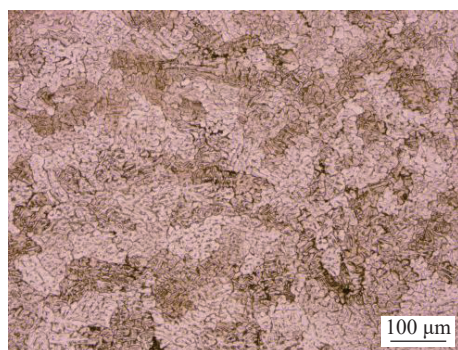
中 A_6 区、 A_7 区和 A_8 区分别对应的焊缝热影响区、熔合线区和熔合区的高倍组织形貌,如图 7 所示。图 7 中焊缝热影响区形貌中远离熔合区方向,试样显微组织丝织构特征显著,而随着向熔合区靠近,晶粒长宽比降低,呈现等轴晶形貌特征。与热影响区组织形貌特征不同,在凝固过程中与母材直接接触的液态金属冷却速率较高,形成了图 7(b) 中细小的晶粒。熔合区处于焊缝中心位置,热量分布相对均匀,因此组织多为等轴晶。然而,图 7(c) 中的焊缝熔合区组织等轴树枝晶特征显著,说明液态金属冷却较为迅速,导致晶粒生长不够充分。



(a) 热影响区



(b) 熔合线区



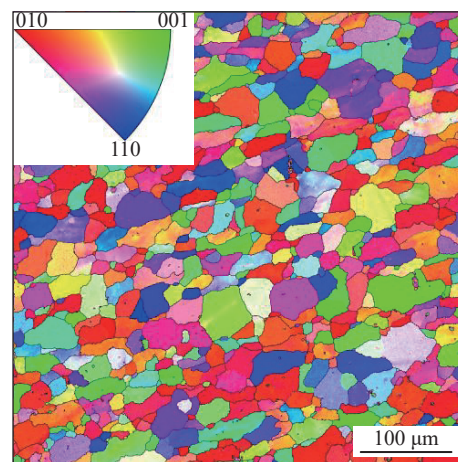
(c) 熔合区

图 7 焊缝横截面金相组织形貌

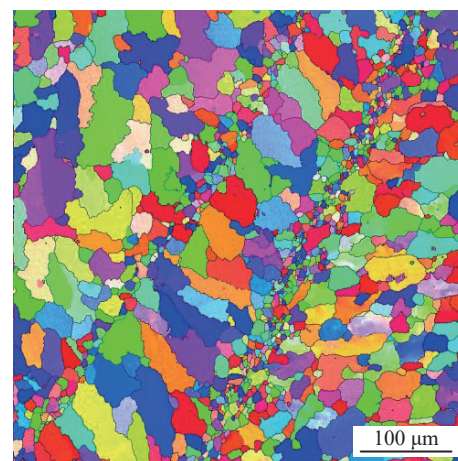
Fig. 7 Metallographic microstructures of weld seam cross-sectional. (a) heat-affected zone; (b) fusion line region; (c) fusion zone

焊缝特征区晶粒形貌 EBSD,如图 8 所示。母材热影响区的晶粒在熔池导热的作用下长宽比降

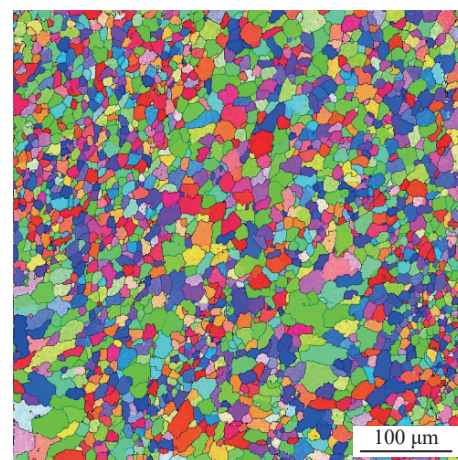
低,最终呈现等轴晶形貌;熔合线区的晶粒可以沿着熔合线分成两种晶粒特征,在熔合线内侧为熔池凝固组织。由于该位置的金属直接与母材接触,温度梯度最大,冷却速率最快,晶粒生长时间较短,因此尺寸较小。相反,熔合线外侧区为母材组织,在焊接热的加热作用下,晶粒粗化。熔合线区的这种大



(a) 热影响区



(b) 熔合线区



(c) 熔合区

图 8 焊缝特征区晶粒形貌 EBSD

Fig. 8 Grain morphology EBSD in weld seam characteristic zone. (a) heat-affected zone; (b) fusion line region; (c) fusion zone

差异晶粒可能成为焊接接头强度的薄弱区. 与热影响和熔合线区组织形貌特征不同, 熔合区为分布均匀的细晶区. 原因为熔合区作为热量向外流失的核心区, 热量分布较为均匀, 对应的凝固组织也较为均匀. 结合文献 [13] 分析认为, 焊缝熔合区作为液态金属凝固结束区, 应具有较大的晶粒尺寸, 较小的晶粒尺寸意味着整个焊缝区凝固速率较高.

使用扫描电子显微镜, 分别观察了焊缝顶部、中部和底部区域显微组织形貌, 焊缝扫描电镜组织及元素能谱分布, 如图 9 所示. 焊缝的物相组成较为简单, 分别为灰色的 α -Al 基体和白色的 θ 相. 通过能谱分析面扫结果可清楚地看到, θ 相中 Cu 元素和 Zn 元素含量较高, 说明在液态金属凝固过程中 Cu 元素和 Zn 元素向着晶粒长大方向扩散并最终在晶界富集. 因此, Cu 元素和 Zn 元素扩散及扩散的均匀性将影响焊缝显微组织. 而且, 在焊缝观察的区域均发现了尺寸超过 $10\ \mu\text{m}$ 的微孔. 微孔和 θ 相同样沿着晶界分布, 且发生在晶粒数量大于 3 的交汇位置, 对外呈现“蜿蜒”状特征. 根据微孔的形状以及分布特征, 可以推测这些微孔是在熔池凝固过程中, 液态金属流动不均造成局部区域凝固消耗液态金属量大于补充量的结果. 凝固速率过高往往会造成这种现象. 被焊件厚度增加, 熔池金属与母材的接触面积随之增加, 使得维持液态金属流动性的热量迅速被母材传导吸收, 造成焊缝内部形成微孔缺陷, 影响焊缝的力学性能.

为验证对微孔影响焊缝力学性能的推测, 使用扫描电子显微镜分别观察了母材、焊缝顶部切片、焊缝中部切片和焊缝底部切片拉伸件断口形貌, 如图 10 所示. 母材与焊缝切片断口形貌存在显著差异, 母材断口表面存在大量密集针状韧窝分布区, 同时存在拉伸过程中形成的撕裂棱, 形貌特征与母材较高的断后伸长率和抗拉强度相对应. 焊缝韧窝直径较大, 深度较浅, 多呈扁平状, 在韧窝的内部可见数量较多的细碎颗粒. 结合图 9(d) 能谱分析面扫检测结果可知, 图 10 颗粒为富集 Cu 元素的 θ 相. 同时, 在局部区域还观察到了微孔的剖截面, 结合文献 [14] 认为, 当拉伸载荷作用到焊缝上时, 裂纹在这些微孔区萌生并不断扩展, 最终发生断裂. 因此, 微孔通过萌生微裂纹影响焊缝的拉伸性能. 从拉伸性能测试结果看, 微孔主要集中在对断后伸长率和抗拉强度的影响上. 该区域作为潜在裂纹的起裂源, 应力分布不均匀. 当拉伸载荷作用到该区域

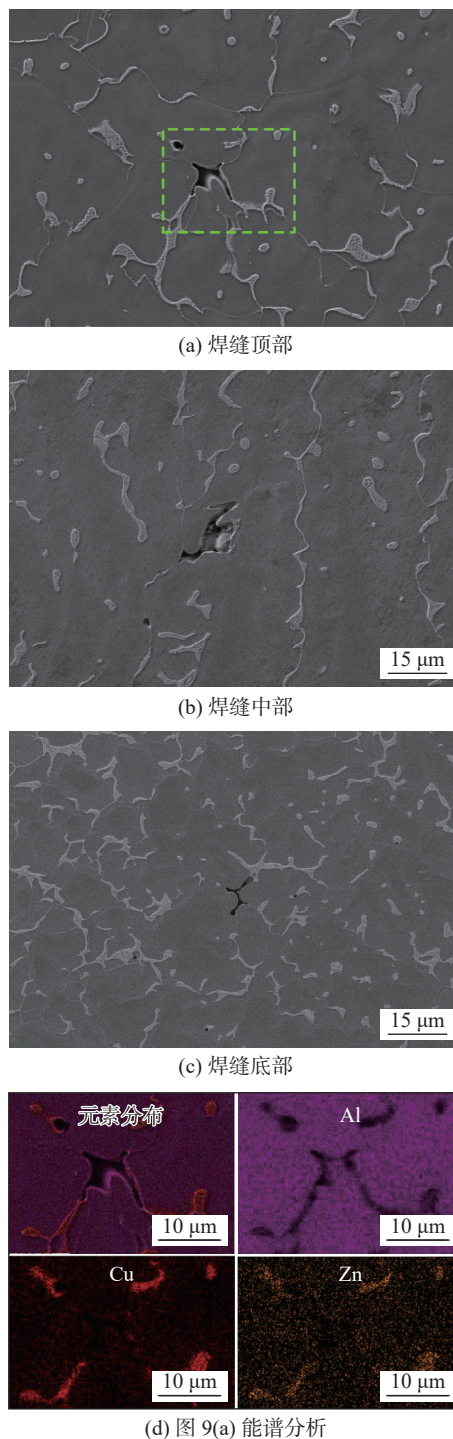


图 9 焊缝扫描电镜组织和元素分布

Fig. 9 Scanning electron microscope micrograph of the weld seam and elemental distribution. (a) top area of weld seam; (b) middle area of weld seam; (c) bottom area of weld seam; (d) energy dispersive spectrometer analysis of Fig. 9(a)

时, 应力较高的区域基本无塑性变形的过程, 整体对外呈现一种脆断. 从宏观上看, 微孔的存在缩小了焊缝金属抵抗拉伸载荷作用的面积, 焊缝拉伸性能因此降低. 而且, 随着试样横截面积缩小, 这种削弱效果而越来越明显. 将焊缝切割为切片的行为,

加剧了微孔对焊缝的拉伸性能的影响,造成切片的抗拉强度低于焊缝。相比拉伸性能,微孔对显微硬度影响较小,基本不会随着拉伸载荷作用面积的变化而发生显著变化,因此焊缝区局部之间的显微硬度较为稳定。影响焊缝抗拉强度的原因,主要为拉伸载荷作用下,微孔继续生长。文中厚度为 17 mm 的铝合金展示出的良好焊缝成形质量,均匀度较高,内部冶金程度较高,VPAA-TIG 复合焊接工艺在厚板铝合金单面焊接、双面成形方面的应用价值获得了印证。焊接厚度与熔池冷却速率相关联。焊接厚度越大,熔池凝固越快,焊缝内部越容易产生微孔等凝固缺陷,从而影响焊缝结合强度。因此,延长熔池维持和凝固时间可能是改善大厚度焊接接头强度的有效策略。

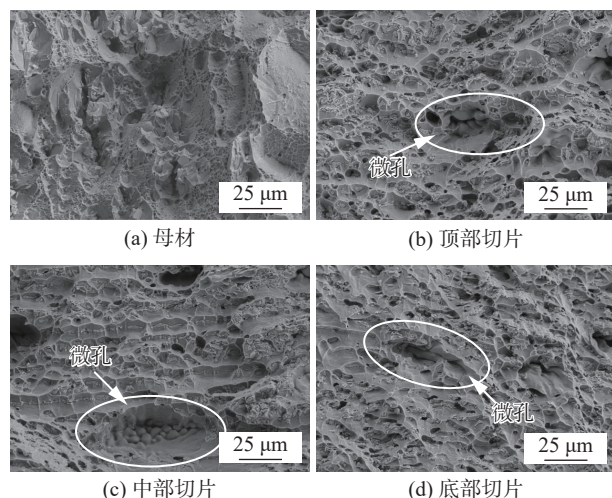


图 10 焊缝拉伸断口表面扫描电镜形貌

Fig. 10 Weld tensile fracture surface scanning electron microscope morphology. (a) base metal; (b) top slice of weld seam; (c) middle slice of weld seam; (d) bottom slice of weld seam;

3 结论

(1) 采用 VPAA-TIG 复合焊接工艺成功进行了大厚度铝合金板单面焊-双面成形焊接,焊缝成形质量良好,均匀度较高,内部冶金程度较高。

(2) 焊缝熔合区硬度呈现均匀分布,平均值为 $67.6\text{HV}0.2 \pm 2.7\text{HV}0.2$; 抗拉强度和断后伸长率达到了母材的 62.83% 和 24.81%。

(3) 界面区形成“蜿蜒”状微孔,原因为焊件的厚度扩大了熔池散热面积,焊缝晶粒生长不充分。微孔在拉伸载荷作用下的继续生长,影响焊缝抗拉

强度的主要原因。

(4) 焊缝力学性能较为均匀,然而微孔缺陷的存在降低了焊缝的抗拉强度。延长熔池维持和凝固时间可改善大厚度焊接接头强度。

参考文献

- [1] 管仁国, 娄花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状, 趋势及展望[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(5): 68 – 75.
GUAN Renguo, LOU Huafen, HUANG Hui, *et al.* Development of aluminum alloy materials: current status, trend, and prospects[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(5): 68 – 75.
- [2] WANG R H, WEN Y, CHEN B A. Sn microalloying Al-Cu alloys with enhanced fracture toughness[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2021, 814: 141243.
- [3] 王泽荫. 铝合金焊接技术现状研究[J]. *世界有色金属*, 2021, 46(8): 132 – 134.
WANG Zeyin. Research on status of the aluminum alloy welding technology[J]. *World Nonferrous Metals*, 2021, 46(8): 132 – 134.
- [4] SHU F Y, TIAN Y, ZHAO H Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of multi-pass TIG welded joint of thick Al-Zn-Mg alloy plate[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(10): 1065e1.
- [5] WANG J Y, JIANG Y Q, ZHU J, *et al.* Development of swing arc narrow gap GMAW process assisted by swaying wire[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 318: 118004.
- [6] WANG T H, LI Y W, MAO Y H, *et al.* Research status of deep penetration welding of medium-thick plate aluminum alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(11): 6993 – 7010.
- [7] NI Z D, DONG B L, LI Y H, *et al.* Effects of processing parameters on molten behavior, arc stability, and defect forming in swing-arc narrow gap GMA vertical up welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 321: 118155.
- [8] LIN H L, CHEN G C, CHENG C M. Effects of plasma-MIG hybrid welding parameters on performance and hot cracking susceptibility of 5083 Al alloy butt-joint welds[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 122(9): 4055 – 4064.
- [9] FASIL K T, AYITENE M G. The grey-based Taguchi method was used to enhance the TIG-MIG hybrid welding process parameters for mild steel[J]. *Invention Disclosure*, 2024, 4: 100016.
- [10] CHEN C, FAN C L, LIU Z, *et al.* Microstructure evolutions and properties of Al-Cu alloy joint in the pulsed power ultrasonic-assisted GMAW[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33: 1397 – 1406.

[下转第 120 页]

- Metals, 1980, 32(3): 38 – 39.
- [12] DE A K, SPEER J G, MATLOCK D K. Color tint-teching for multiphase steels[J]. *Advanced Material & Processes*, 2003, 161(2): 27 – 30.
- [13] YU C Y, LIU Q, CAI Z P, *et al.* Effect of solidification segregation on microstructure and mechanical properties of a Ni-Cr-Mo-V steel weld metal[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2022, 53(4): 1394 – 1406.
- [14] SUN J, LU S P. Influence of inter-dendritic segregation on the precipitation behaviour and mechanical properties in a vanadium-containing Fe-Cr-Ni-Mo weld metal[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 186: 174 – 179.
- [15] 孙健. Fe-Cr-Ni-Mo 系熔敷金属组织与性能研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- SUN Jian. Research on microstructure and properties of Fe-Cr-Ni-Mo deposited Metal[D]. Heifei: University of Science and Technology, 2020.
-
- 作者简介: 亢天佑, 博士, 高级工程师; 主要研究方向为焊材材料及工艺; Email: kagtianyou123@163.com.

(编辑: 汤明日)

[上接第 113 页]

- [11] LIU Z G, JIN X Z, ZHANG J Y, *et al.* Microstructure evolution and mechanical properties of SUS301L stainless steel sheet welded joint in ultrasonic vibration assisted laser welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 153: 108193.
- [12] XU B, TASHIRO S, TANAKA M, *et al.* Physical mechanisms of fluid flow and joint inhomogeneity in variable-polarity plasma arc welding of thick aluminum alloy plates[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(8): 087103.
- [13] 彭云, 许良红, 田志凌, 等. 焊接热输入对高强铝合金接头组织和性能的影响 [J]. *焊接学报*, 2008(2): 17 – 21.
- PENG Yun, XU Lianghong, TIAN Zhiling, *et al.* Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of the high strength aluminum alloy welds[J]. *Transactions of the China Welding*, 2008(2): 17 – 21.
- [14] JIANG G L, GAO M J, YANG S L, *et al.* Microstructure, defects, and mechanical properties of wire + arc additively manufactured AlCu4.3-Mg1.5 alloy[J]. *Materials & Design*, 2020, 186: 108357.
-
- 作者简介: 章朋田, 硕士, 高级工程师; 主要从事航天器产品焊接以及高效焊接工艺等方面的研究; Email: zptforever@126.com.
- 王小伟 (通信作者), 博士; Email: 15290408287@163.com

(编辑: 汤明日)