

5083铝合金薄板CMT+P焊接接头组织与力学性能研究

王军亮, 穆壮壮, 郁炎, 王硕, 孙晓毅, 武国举

中国船舶集团有限公司第七二五研究所 河南洛阳 471000

摘要: 采用冷金属过渡-脉冲 (CMT+P) 焊接方法对5083铝合金薄板进行焊接, 采用扫描电镜、硬度计、万能材料试验机等手段对焊接接头的微观组织与力学性能进行分析。结果表明: CMT+P焊接时熔滴过渡方式为短路过渡和射滴过渡; 焊缝组织为典型的铸态等轴晶, 热影响区为加工态纤维组织与局部等轴晶混合组织, 在热影响区发现骨骼状或块状的AlFeMn富铁杂质相。相较于母材组织, 焊缝平均晶粒尺寸达 $46.31\mu\text{m}$, 大角度晶界占比达16.43%。焊缝区硬度77~81HV, 焊接接头抗拉强度为295MPa, 达到母材的89.39%; 断后伸长率为15%, 达到母材的75%。

关键词: 5083铝合金; CMT+P焊接; 微观组织; 力学性能

Study on microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy sheet CMT + P welded joint

WANG Junliang, MU Zhuangzhuang, YU Yan, WANG Shuo, SUN Xiaoyi, WU Guojun

China Shipbuilding Industry Corporation No.725 Research Institute, Luoyang 471000, Henan, China

Abstract: Cold metal transfer-pulse welding (CMT+P) of 5083 aluminum alloy sheet was carried out in this paper. The microstructure and mechanical properties of welding joint were investigated using scanning electron microhardness, microhardness tester and tensile testing machine. The results show that the welding bead was well formed. The weld microstructure is as cast equiaxed dendrite, the heat affected zone microstructure is the mixed structure of processed fibers and local equiaxed grains and the base metal is still rolled fiber structure. Bone-like or block iron rich impurity phase AlFeMn were found in welded joints and heat-affected zones. Compared with the base metal structure, the grain size of the weld area is $46.31\mu\text{m}$, and the proportion of large-angle grain boundaries is 16.43%. The hardness of the weld area is 77~81HV, and the tensile strength of the welded joint is 295MPa, which is 89.39% of that of base metal. Elongation after fracture reaches 15%, which is 75% of the base material.

Keywords: 5083 aluminum alloy; CMT+P welding; microstructure; mechanical property

1 序言

5083铝合金属于典型的铝-镁系合金, 具有比强度高、耐蚀性和焊接性好、易加工制造等优点, 广

泛应用于高速列车、地铁、液化天然气LNG、船舶工业等领域。作为不可热处理强化的铝合金, 其只能通过加工硬化或细晶强化来提高强度, 在船舶工

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB3704205)。

业领域，由于主体轻量化和整体结构合理性的需要，因此5083铝合金在船舶尤其是液化天然气运输船生产制造过程中作为焊接结构材料得到广泛应用^[1, 2]。

目前，焊接作为一种重要的金属材料连接方法，在提高材料利用率、减轻结构重量等方面优势明显。近年来，国内外学者针对5083铝合金的焊接方法和工艺进行了大量的研究，包括TIG、MIG、PAW及高能束（LBW、EBW）等；安治业等^[3]在对Al-Mg-Si 合金进行激光-MIG复合焊接研究中发现，焊缝不可避免地会出现氢气孔。徐国建等^[4]在6082铝合金CMT焊接研究中发现，通过调整焊接参数可以有效避免夹钨、裂纹、气孔和焊接变形等缺陷，且可获得较高的焊接接头抗拉强度。CAI等^[5]采用等离子-MIG复合焊和MIG焊研究船用5083铝合金焊接接头的微观组织、拉伸及弯曲性能，发现等离子体-MIG复合焊焊接效率较高。近年来，Fronius公司提出了一种新型焊接方法——冷金属过渡（Cold Metal Transfer, CMT），通过抽拉将传统MIG焊的爆断式熔滴过渡模式转变为无飞溅的短路过渡，包括加热过程和冷却过程，进而实现对焊接热输入的精准控制。

在单纯的CMT焊接过程中，其电流较小会导致焊缝熔深不足，不适合3mm以上铝合金厚板的焊接。CMT+P焊接是在CMT焊的基础上，通过加入脉冲，进而增加脉冲峰值电流密度，使得电弧热量更为集中，穿透能力更强，进而增加焊缝熔深^[6-8]，因而具有更广的热输入调节范围。脉冲周期的加入提高了对熔深的控制，通过调节CMT和P周期的个数，可以实现焊接过程热输入的精准控制，使焊接过程更为稳定。5083铝合金作为不可热处理强化铝合金，采用单独的CMT焊接并不能一次实现单面焊双面成形，通过加入脉冲，能够明显改善焊缝成形和力学性能。目前，郭超慧等^[9]通过调整CMT+P焊接参数，系统研究了焊接电流对5083铝合金焊接接头组织及力学性能的影响。但对于5083铝合金CMT+P焊接接头的微观组织表征还缺乏相应研究，因此有必要开展5083铝合金CMT+P焊接试验，进一步为实际工业应用提供指导意义。

2 试验过程

2.1 试验材料

母材采用3mm厚的5083铝合金轧制退火态（O态）板材，采用线切割方法沿着板材轧制方向切割成尺寸为400mm×200mm×3mm的试板，选用直径为1.2mm的ER5183焊丝，化学成分和力学性能分别见表1、表2，铝板开单边30°坡口，间隙为1mm，如图1所示。

表1 5083铝合金的化学成分（质量分数）（%）

Cu	Mg	Si	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Al
≤0.10	4.0~4.9	0.40	0.4~1.0	≤0.4	0.05~0.25	≤0.25	≤0.15	余量

表2 5083铝合金室温力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）
240	333	20

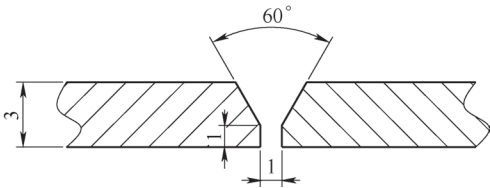
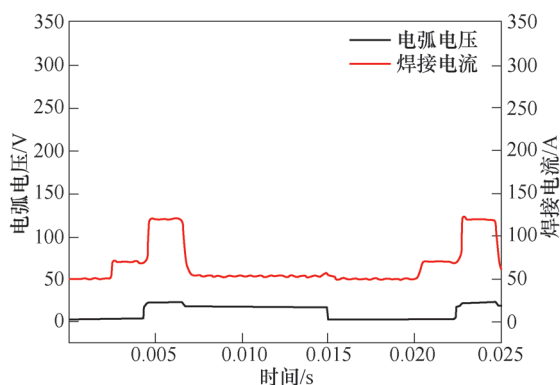


图1 坡口形式及尺寸

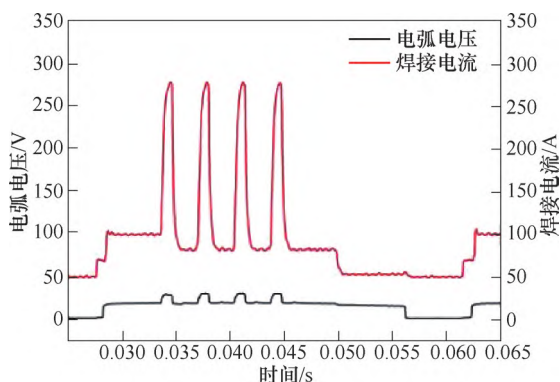
2.2 试验方法

CMT+P焊接试验所用焊机为Fronius TPS4000 Advanced，焊接电流输出模式包括CMT、脉冲和直流。焊接时采用KUKA 六轴联动机器人KR60HA带动MIG焊枪完成焊接过程，定位精度<0.05mm。所用高速摄像系统为Acuteye V4.0，主要由高速相机（德国Optronis CP70-1HS-M/C-1900）、加固型便携式工控机Manfrotto、专用激光光源和光学镜头组成，CMT焊添加脉冲时，其焊接电流、电弧电压波形如图2所示。CMT+P焊实际上就是在CMT+P模式下，将高能量的高频脉冲全部加到燃弧的峰值阶段，这样显著增加了CMT+P焊的热输入量，脉冲周期可以进一步分为脉冲峰值阶段（Pulse Peak Time）和脉冲基值阶段（Pulse Base Time）。

本焊接试验送丝速度为5.4m/min，焊接电流为90A，电弧电压为12V，焊枪倾斜角度为15°，弧



a) 无脉冲



b) 4个脉冲1个CMT

图2 焊接电流、电弧电压波形 (送丝速度5.4m/min)

长修正系数为 -0.3 ，电感修正系数为 -5.0 ，采用CMT+P模式，对接缝隙为 1mm 。

焊接完成后，利用线切割沿垂直于焊缝方向截取大小为 $30\text{mm} \times 10\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的硬度检测试样，分别用 $80\#$ 、 $240\#$ 、 $400\#$ 、 $600\#$ 和 $2000\#$ 的砂纸依次进行打磨。在每次更换砂纸前，将试样旋转 90° ，消除前一道砂纸在试样表面产生的划痕，直至试样表面清洁、光亮、无划痕，随后进行抛光和腐蚀，腐蚀时间约为 20s 。采用配有能谱仪(EDS)和电子背散射衍射(EBSD)探头的场发射扫描电镜对焊接接头微观组织、晶粒取向进行观察和分析；制作EBSD试样先采用打磨、机械抛光后再振动抛光。

根据GB/T 2651—2023《焊接接头拉伸试验方法》，在 300kN INSTRON 5587万能材料试验机上进行板拉伸测试试验，拉伸试样形状尺寸如图3所示。拉伸速率为 2mm/min ，拉伸方向垂直于焊缝轴线方向；显微硬度测试在显微维氏硬度计VH3300上完成，从焊缝中心开始向单侧母材逐点等间距测量，其显微维氏硬度检测加载载荷为 200g (1.96N)，加载时间为 10s 。

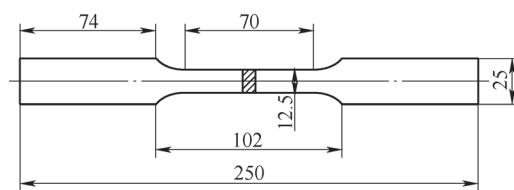
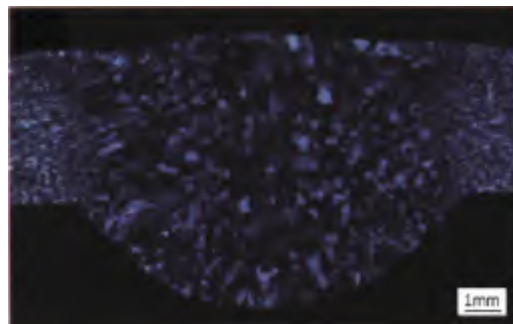


图3 焊接接头拉伸试样形状尺寸

3 结果与分析

3.1 焊缝横截面与宏观形貌

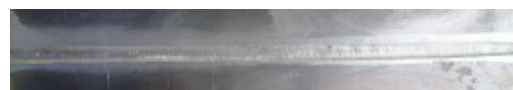
3mm 厚的5083-O态铝合金CMT+P焊接接头的横截面与宏观形貌如图4所示。由图4可看出，在合适的CMT+P焊接工艺条件下可得到成形稳定均匀、过渡圆滑、鱼鳞纹均匀致密的焊缝，表面无裂纹和咬边等缺陷，呈现银白色，焊接接头内部无气孔、裂纹等缺陷，满足相关标准要求。



a) 焊接接头横截面形貌



b) 焊缝正面



c) 焊缝背面

图4 焊接接头横截面与宏观形貌

3.2 CMT+P焊接熔滴过渡分析

通过高速摄影得到的CMT+P焊接熔滴过渡过程如图5所示。由图5可知，每个脉冲周期可进一步分为3个阶段：熔滴生长、熔滴脱落、熔滴进入熔池。在脉冲的高电流下(见图5d)，表现出了典型的射滴过渡模式，并且是稳定的一脉一滴的形式，这是由于此时的焊接电流较大且电弧电压较高，电磁收缩力较大，熔滴表面张力较小，因而熔滴细小，形成了射滴过渡模式。图5e所示为CMT阶段，为典型的短路过渡模式，整个过程过渡稳定。图5f所示为一个新的CMT+P焊接熔滴过渡过程的开始。

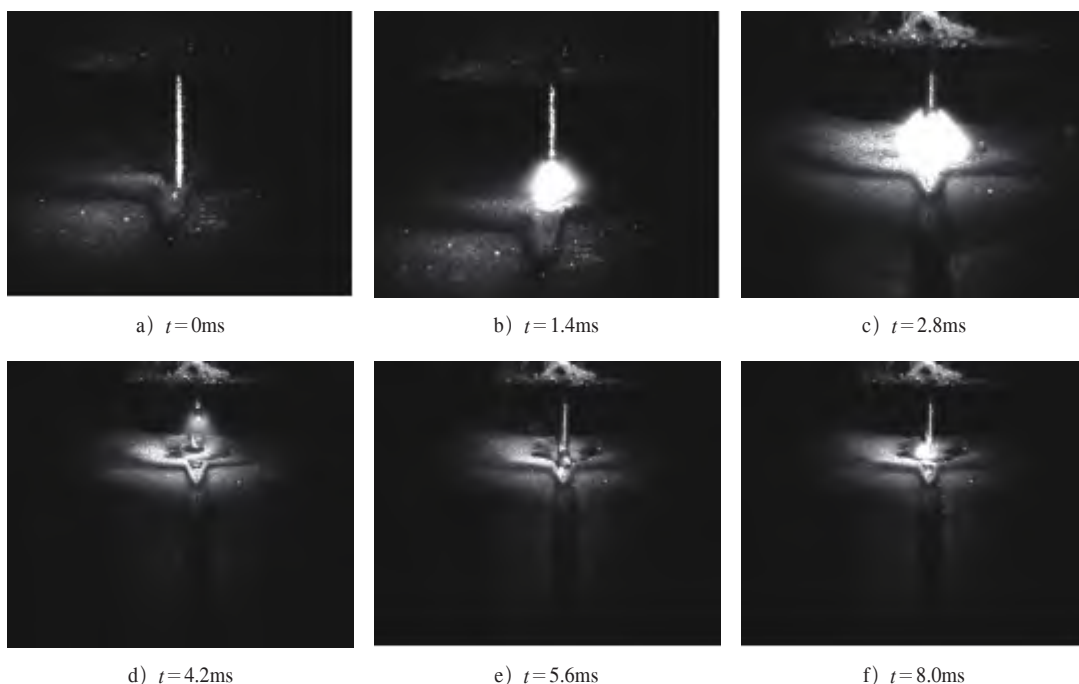


图5 CMT+P焊接熔滴过渡过程

3.3 焊接接头的微观组织

选择焊接接头焊缝区 (Weld Zone, WZ)、热影响区 (Heat Affected Zone, HAZ) 和母材 (Base Metal, BM) 等位置进行相关EBSD表征。图6所示为5083铝合金焊接接头不同区域EBSD结果。图6a所示为合金焊缝区组织, 焊缝区晶粒组织主要显示为等轴晶组织, 焊缝晶粒呈现出随机分布, 无明显取向; 主要原因是合金焊接过程中熔池快速冷却结晶, 溶质浓度的差异及溶质不均匀扩散, 形成了典型的铸态组织^[10]。热影响区表现为加工态纤维组织与局部等轴晶混合组织 (见图6b)。热影响区组织主要是焊接过程中, 在焊接热影响作用下焊接热输入由焊缝区传递到热影响区, 该区域过冷度较小, 靠近焊缝区的组织由原来的加工纤维组织发生回复和部分再结晶, 变成等轴状组织, 接近母材位置组织依然为轧制纤维组织。原始母材组织呈现明显拉长状晶粒, 表明为典型的加工纤维流线组织 (见图6c)。对焊接接头晶粒尺寸进行相关统计 (见图6d~f) 可知, 焊缝区平均晶粒尺寸为 $46.31\mu\text{m}$, 热影响区的平均晶粒尺寸为 $20.88\mu\text{m}$, 原始母材的平均晶粒尺寸为 $20.87\mu\text{m}$ 。

晶粒取向统计结果如图6g~i所示, 其中将取向角介于 $2^\circ \sim 15^\circ$ 之间的晶界定义为小角度晶界

(Low Angle Grain Boundaries, LAGBs), 取向角 $>15^\circ$ 的晶界定义为大角度晶界 (High Angle Grain Boundaries, HAGBs)。晶粒取向结果表明, 焊缝区、热影响区和母材晶粒取向分布规律无明显差异。为明确焊接接头各区域晶粒取向, 将焊接区域的晶粒取向进行统计, 结果见表3。由表3可看出, 焊缝区、热影响区、母材大角度晶界分别占比达16.43%、28.63%和20.25%, 平均取向差为 8.55° 、 13.39° 和 10.03° 。晶界比例和晶粒尺寸会对材料性能产生较大影响。根据Hall-Petch公式可知, 随着晶粒尺寸减小晶界密度增加, 高密度晶界阻碍位错滑移运动效果显著, 导致接头强度提升; 同时大角度晶界增多易在晶界处塞积, 起到延缓裂纹扩展的作用, 有效改善韧性, 大角度晶界占比提升对于提高接头性能有一定作用^[11]。

3.4 焊接接头的扫描形貌

图7所示为5083铝合金焊接接头扫描形貌及EDS能谱图。热影响区 (见图7a) 和焊缝区 (见图7b) 的析出相主要为白色或灰白色的第二相, 呈块状、棒条状或骨骼状等不规则形状, 尺寸上有较大差别, 且方向上无明显规律。为明确析出相的成分, 选取部分析出相进行能谱分析, 研究发现这些第二相主要富含 Al、Mg、Mn和Fe等元素。另外, 有些

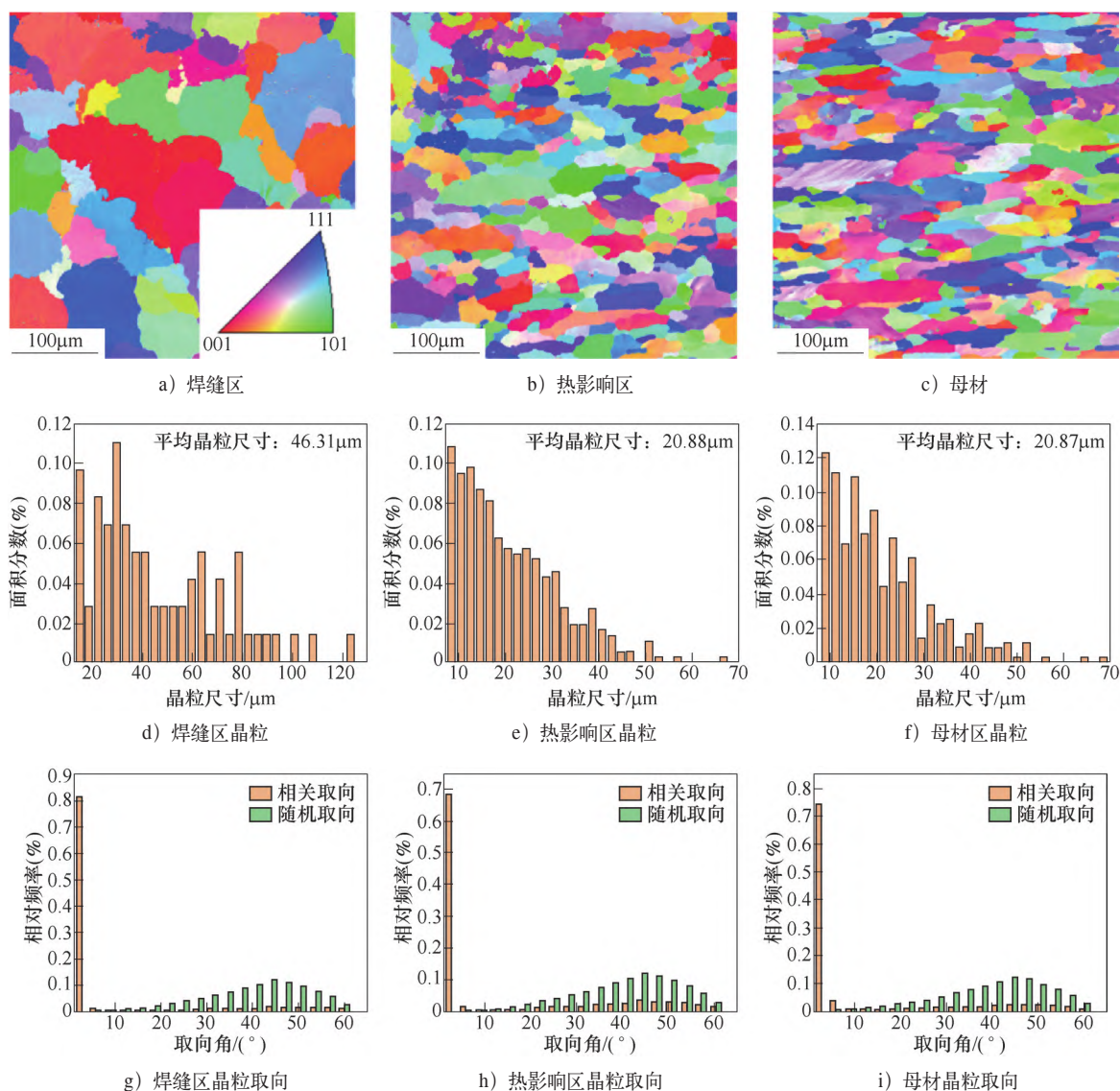


图6 5083铝合金焊接接头不同区域EBSD结果

表3 5083铝合金焊接接头大小角度晶界分数及平均取向差

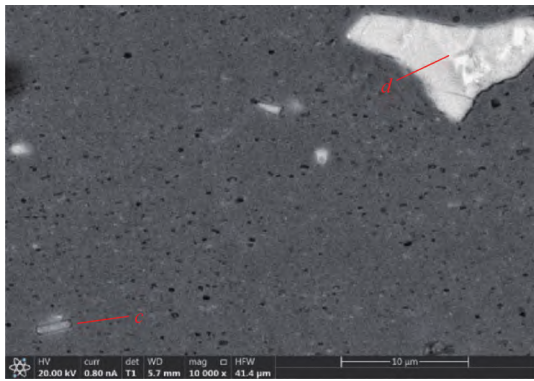
项目	小角度晶界分数 (%)	大角度晶界分数 (%)	平均取向差 / (°)
焊缝区	83.57	16.43	8.55
热影响区	71.37	28.63	13.39
母材	79.75	20.25	10.03

还含有少量的Si和Cr元素。根据能谱分析结果,焊接接头热影响区棒状析出相和焊缝基体主要为AlMg相,根据热影响区块状相和焊缝骨骼状相能谱分析结果及相关报道^[12, 13],这些析出相主要为富铁杂质相AlFeMg。部分能谱分析出的C、O等元素(见图

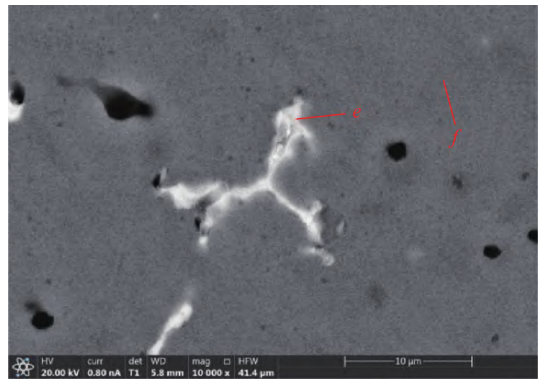
7e),可能是研磨抛光时析出相脱落造成的^[11]。

3.5 焊接接头的力学性能

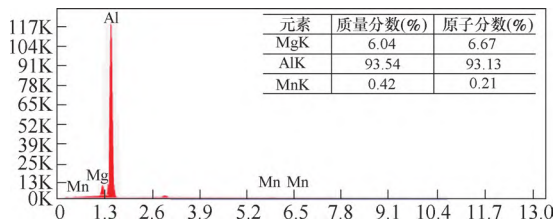
对5083铝合金焊接接头焊缝区、热影响区和母材显微硬度进行检测,结果如图8所示。焊缝区硬度为77~81HV,热影响区硬度为76~83HV,而母材硬度为88~90HV。由图8可明显看出,焊缝区和热影响区出现软化现象,硬度明显低于母材。从焊缝区、热影响区再到母材,硬度值总体呈现逐步提升,这与焊后接头部位组织分布相对应。有研究^[11, 14]表明,焊接热输入使得焊缝区主元素烧损严重,导致焊缝硬度降低;同时焊接热循环也使得接头不同区域硬度值存在明显差别。微观组织的晶粒尺寸



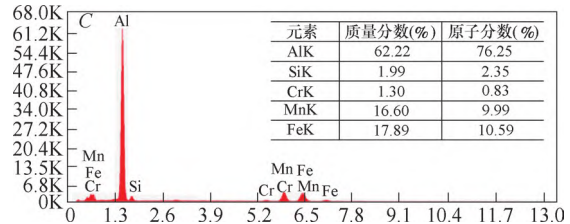
a) 热影响区



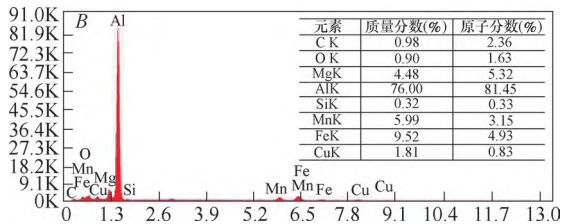
b) 焊缝区



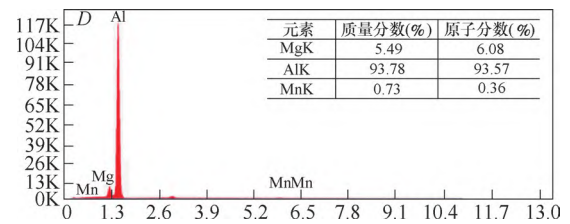
c) c处EDS成分



d) d处EDS成分



e) e处EDS成分



f) f处EDS成分

图7 5083铝合金焊接接头扫描形貌及EDS能谱图

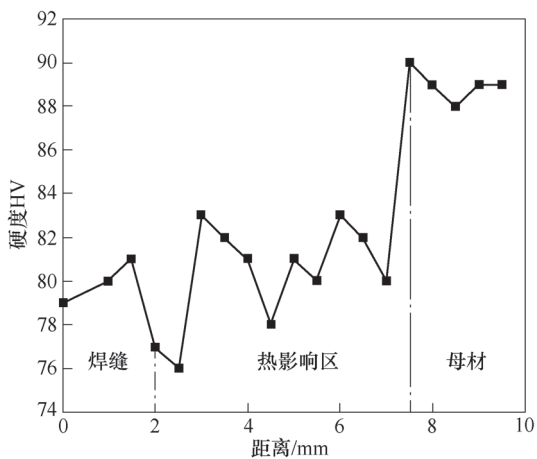


图8 5083铝合金焊接接头显微硬度分布

和析出相的分布状态是决定硬度的重要因素。焊接接头硬度低主要有以下因素。

1) 焊接过程中焊缝区受热影响作用出现晶粒粗化, 微观组织由原来的轧制纤维状组织转变为粗大树枝晶, 加工硬化作用和细晶强化作用减弱。同

时, 对于组织疏松或多气孔位置也会导致硬度偏低。

2) 焊接时热输入导致Mg元素烧损, 使其固溶强化作用削减, 进而导致焊接接头出现软化^[15]。

5083铝合金焊接接头拉伸试验结果见表4。由表4可看出, 两组试样拉伸断口均在焊缝区, 这也与前文焊缝区硬度值最低相呼应, 焊接接头焊缝区典型的铸态粗大枝晶组织减弱了合金变形强化作用。同时, 焊接热输入引起的Mg元素烧损导致固溶强化作用减弱, 二者综合作用使得焊缝位置成为焊接接头最薄弱的地方, 因此接头在该位置发生断裂。

表4 5083铝合金焊接接头拉伸试验结果

试样编号	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	断裂位置
1	286	17.5	焊缝中心
2	304	12.5	焊缝中心

4 结束语

通过采用CMT+P焊接方法实现了3mm厚5083铝合金的焊接,对焊接过程熔滴过渡、接头显微组织特征和力学性能进行了研究,试验结论如下。

1) 5083铝合金采用CMT+P焊接工艺可以获得优良的焊接接头。熔滴过渡方式为短路过渡和射滴过渡,接头焊缝组织为典型铸态等轴晶,热影响区为加工态纤维组织与局部等轴晶混合组织,母材组织为轧制纤维组织。

2) 5083铝合金采用CMT+P焊接接头焊缝区、热影响区和母材平均晶粒尺寸分别为 $46.31\mu\text{m}$ 、 $20.88\mu\text{m}$ 和 $20.87\mu\text{m}$,大角度晶界占比分别达16.43%、28.63%和20.25%,平均取向差为 8.55° 、 13.39° 和 10.03° 。

3) 5083铝合金采用CMT+P焊接接头硬度从母材、热影响区到焊缝区总体呈现递减趋势,母材硬度为88~90HV,热影响区硬度为76~83HV,焊缝中心硬度为77~81HV。接头平均抗拉强度和断后伸长率分别达到295MPa、15%,与母材性能基本相当。

参考文献:

- [1] 蹇海根, 谢幸儿, 尹志民, 等. 铝镁合金板材MIG焊接接头组织与性能研究[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27 (3): 79-83.
- [2] 苏太举. 5083铝合金中厚板变极性等离子弧立焊工艺试验[J]. 金属加工(热加工), 2018 (5): 53-54.
- [3] 安治业, 赵红伟, 田爱琴, 等. 6005A铝合金激光-MIG复合焊接对板厚的工艺适应性[J]. 电焊机, 2014, 44 (10): 118-122.
- [4] 徐国建, 王子健, 杭争翔, 等. 薄板铝合金的CMT焊接工艺[J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40 (6): 638-642.
- [5] CAI D T, HAN S G, ZHENG S D, et al. Plasma MIG hybrid welding process of 5083 marine aluminum alloy[J]. Materials Science Forum, 2016, 850: 519-525.
- [6] PANG J, HU S, SHEN J, et al. Arc characteristics and metal transfer behavior of CMT+P welding process[J]. Journal of Materials Processing

Technology, 2016, 238: 212-217.

- [7] LI J, SHEN J, HU S, LIANG Y, et al. Microstructure and mechanical properties of 6061/7N01 CMT+P joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 264: 134-144.
- [8] 李俊杰. 6061铝合金变极性CMT及CMT+P熔滴过渡行为及其焊接成形研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [9] 郭超慧, 王鹏云, 褚少旗, 等. CMT+P焊接电流对5083铝合金焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2022 (4): 71-76.
- [10] DUDZIK K. Influence of joining method for hardness distribution in joints of AlZn5Mg1 alloy[J]. Journal of Kones, 2010, 17 (14): 137-141.
- [11] 刘洪旭, 侯旭儒, 刘峰, 等. Zr添加对7A52铝合金CMT+P焊接接头组织及性能影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 32 (11): 3352-3364.
- [12] 张平, 李奇, 赵军军, 等. 7A52铝合金中第二相分析及微区电位测试[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21 (6): 1252-1257.
- [13] 王洪斌, 张新宇, 李胜利, 等. Mn添加对双辊铸轧6061铝合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (1): 129-137.
- [14] 闫德俊, 李海洋, 刘晓莉, 等. 船用5083铝合金变极性等离子焊接接头组织和性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47 (10): 3162-3165.
- [15] 陈澄, 薛松柏, 孙平浩, 等. 5083铝合金TIG焊接接头组织与性能分析[J]. 焊接学报, 2014, 35 (1): 38-40.

(收稿日期: 20250109)