

船用 5083 铝合金变极性等离子焊接头组织和性能

闫德俊¹, 李海洋², 刘晓莉¹, 钟美达¹, 罗玖强¹, 梁志敏²

(1. 中船黄埔文冲船舶有限公司 广东省舰船先进焊接技术企业重点实验室, 广东 广州 510715)

(2. 河北科技大学, 河北 石家庄 050018)

摘 要: 采用变极性等离子焊接工艺实现了 5 mm 厚船用 A5000 系铝合金立向上位置焊接, 并分析了接头的组织和力学性能。力学试验显示: 接头抗拉强度达到 295 MPa, 延伸率达到 10%, 断裂位置在熔合线附近; 焊缝区和热影响区的显微硬度均低于母材, 且焊缝中心处最低。接头金相观察发现: 熔合线附近的焊缝为粗大的等轴晶组织, 但焊缝区大部分为胞状树枝晶组织, 从两侧呈对称生长并在焊缝中心处相遇, 热影响区为再结晶组织。利用电子探针分析了拉伸断裂位置附近的成分, 发现该区域 Mg 含量偏低且分布不均匀, 固溶强化效果下降, 组织和成分的不均匀导致该区域成为接头的薄弱部位。

关键词: 5083 铝合金; 变极性等离子焊; 显微组织; 力学性能

中图法分类号: TG457.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)10-3161-06

铝镁合金属于典型的不可热处理强化合金, 具有密度小、比强度高、耐海水腐蚀性好、可焊接和易成型等优点, 一般通过微合金化和加工硬化等手段来改善其综合性能。由于船舶结构合理化和轻量化的需要, 船用 5083 铝镁合金在船舶制造行业得到广泛应用^[1-3]。目前, 船体结构的焊接普遍采用 TIG 焊和 MIG 焊^[4-6], 但是由于 5083 为含镁铝合金, 表面易于生成 MgO 和 Al₂O₃, 焊缝中极易产生气孔, 降低焊缝力学性能和一次合格率, 需要多次清除气孔再焊接。澳大利亚将 FSW 技术应用于 5 mm 厚的 5083-H321 铝合金板材的焊接, 将其作为高速轻型游船的曲面壁板。焊接完成后对焊接接头进行目视检查 and 无损检测, 没有发现焊接缺陷^[7], 但是搅拌摩擦焊在船体制造中的应用有一定的局限性。

变极性等离子弧焊 (VPPA) 技术是一种能量集中、电弧挺度大和焊后变形小的高能束焊接工艺。不需开坡口、焊道窄, 且单面焊双面成型, 立焊时有利于排除焊缝中的气体和夹杂, 可获得无缺陷焊缝, 在铝合金的焊接中具有很好的应用前景^[8,9]。张勤练等人^[10]研究了 2A14 铝合金变极性等离子横向焊接线能量和焊缝正、背面咬边缺陷的规律及产生缺陷的影响因素。姜伟等人^[11]对 2A12 铝合金等离子弧焊进行研究, 并分析了焊缝的组织 and 力学性能。刘黎明等人^[12]研究了

镁合金变极性等离子弧焊接头的微观组织, 所得接头组织均匀, 晶粒细小, 熔合线清晰, 不存在明显的热影响区, 无严重的区域偏析现象。目前, 对于船用 5083 铝合金等离子焊接工艺及其接头组织和成分的研究较少。因此, 本实验研究了船用 5083 铝合金变极性等离子弧立焊工艺, 通过拉伸试验和显微硬度试验确定了接头的薄弱区域, 并采用光学显微镜、电子探针等分析了接头的微观组织和成分分布特点, 为工艺的推广使用和改进提供依据。

1 实 验

采用 VPPA-300 变极性等离子弧焊接电源, 离子气体和保护气体均为 99.9% 的氩气。所用母材为 400 mm×150 mm×5 mm 的轧制态 5083 铝合金板, 选用直径为 $\Phi 1.2$ mm 的专用焊丝。5083 铝合金及焊丝的实际化学成分如表 1 所示。

表 1 5083 铝合金母材及焊丝的化学成分
Table 1 Chemical composition of 5083 aluminum alloy and welding wire ($\omega/\%$)

Component	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Base metal	0.12	0.22	0.6	4.50	0.09	0.02	0.056	Bal.
Welding wire	0.03	0.25	0.75	4.95	0.11	0.025	0.15	Bal.

收稿日期: 2017-10-20

基金项目: 中国博士后科学基金 (2016M590821); 国防科学技术工业基础研究项目 (A0720133002); 黄埔区科技计划项目 (201518); 河北省自然科学基金 (E2016208077)

作者简介: 闫德俊, 男, 1978 年生, 博士, 高级工程师, 中船黄埔文冲船舶有限公司, 广东省舰船先进焊接技术企业重点实验室, 广东 广州 510715, 电话: 020-82096191, E-mail: yandejun_2003@163.com

焊前采用丙酮清洗坡口及两侧的油污等杂质，采用专用刮刀去除表面氧化膜。焊接实验中以立向上位置进行焊接，实现单面焊双面成型。焊接工艺参数如表 2 所示。

焊后沿垂直于焊缝长度方向截取金相、硬度、拉伸试样。拉伸试验采用德国 Zwick 公司生产的 Z100E 型电子式拉力试验机，加载速率 2 mm/min。采用德国蔡司显微镜观察接头显微组织。采用 TMVS-1 维氏硬度计测量焊缝接头位置的硬度分布，载荷力为 4.9 N，加载时间为 10 s，测量位置距焊缝上表面 2 mm，测量点间距 0.5 mm。采用日本岛津设计制造的 EPMA1720 电子探针对接头微区成分进行定量分析。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

5083 母材及焊接接头的拉伸力学性能如表 3 所示。母材具有较高的抗拉强度，350 MPa，断后伸长率为 12%，而焊接接头的抗拉强度为 295 MPa，断后伸长率为 10%，均低于母材，焊接接头的强度系数为 0.84。焊接接头在拉伸过程中发生颈缩现象，且断后伸长率相对较高，认定断裂形式为韧性断裂。从拉伸试样的宏观断裂图（如图 1 所示）上可以看到，拉伸

试样的断裂位置基本均处于焊缝边缘靠近熔合线位置，说明此处是接头的力学性能薄弱区域。

2.2 硬度曲线分析

图 2 为接头显微硬度测试结果。从图中观察到焊缝接头硬度呈“V”型分布。采用专用焊丝焊接 5083 母材时，焊缝区硬度在整个接头中最低，而焊缝中心位置的硬度又是焊缝区的最低值，硬度仅为 780 MPa。在距离焊缝中心 3 mm 左右开始进入热影响区，其硬度值在 800~960 MPa 之间，且随着距焊缝中心的距离增加而变大，硬度逐渐上升。在距离焊缝中心约 15 mm 以外，硬度值维持在为 940~960 MPa 之间，这可以认为是母材硬度。

从硬度曲线图上可以看到，焊接接头的焊缝区和热影响区发生了明显的软化现象。焊缝区的硬度下降可能是由于高能量密度的等离子电弧以穿孔模式焊接时，造成匙孔周围液态金属温度很高，从而导致沸点低的 Mg 元素等发生烧损。而 Mg 元素含量的降低直接导致了固溶强化效果的减弱和硬度的下降。热影响区的软化则与母材初始轧制状态和经历的焊接热循环相关，A5000 系铝合金属于非热处理强化铝合金，其强度的提高一般采用加工硬化的方式实现，在轧制变形过程中晶粒变形严重，位错密度增加，从而造成强度和硬度的提高。在焊接热循环过程中，轧制组织会发生回复和再结晶，部分或全部失去加工硬化获取的强化效果，发生软化^[13]。

2.3 微观组织分析

焊接接头横向截面显微组织如图 3 所示，接头成型美观，背面熔透均匀。实验采用立焊有利于排除焊缝中的气体和夹杂，焊接接头无明显气孔和熔合不良等缺陷。

通常将焊接接头组织分成 3 个区域，分别为母材区、热影响区和焊缝区。从图 3 中可以看到，变极性

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters			
Positive and negative current, I/A	Welding speed, v/mm·min ⁻¹	Wire feeding speed, v/mm·min ⁻¹	Gas flow rate, q/L·min ⁻¹
135, -165	100	130	3.5

表 3 母材及焊接接头拉伸力学性能

Table 3 Tensile strengths of welded joint and base metal				
Material	Tensile strength, R _m /MPa	Yield strength, R _{p0.2} /MPa	Section shrinkage, Z/%	Elongation, A/%
Base metal	350	215	-	12
Welded joint	295	149	18	10

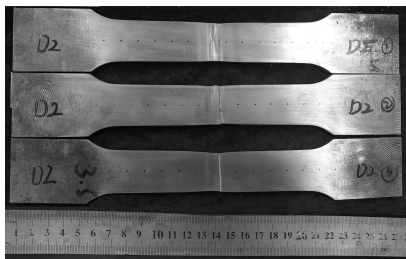


图 1 拉伸试样的断裂位置

Fig.1 Fracture location of tensile specimen

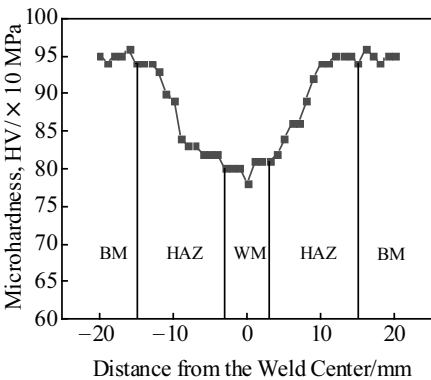


图 2 接头显微硬度分布曲线

Fig.2 Micro hardness profile of the welded joint

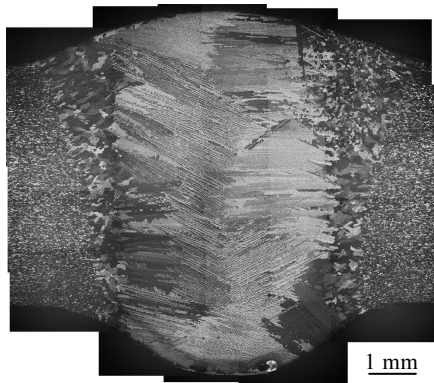


图 3 接头横截面显微组织

Fig.3 Microstructure of joint transverse section

等离子弧焊的焊缝区又分为靠近熔合线处粗大的等轴晶和焊缝内部的胞状树枝晶, 胞状树枝晶从两侧呈对称生长并在焊缝中心处相遇, 形成曲折的相交界面。

图 4 为母材区和热影响区的显微组织。从图 4a 中可以清楚地看到, 母材区呈现为原始轧制态纤维状, 组织为 $\alpha(\text{Al})$ 和少量析出强化相。图 4b 所示为热影响区组织, 由于受热循环的影响, 晶粒形态不再是轧制态, 转变为再结晶组织, 晶粒尺寸长大明显。

焊缝近熔合线处的显微组织如图 5 所示。从图中可以观察到, 熔合线处的显微组织均为等轴晶。图 5a 为焊缝正面靠近焊趾位置的显微组织, 图 5b 为板厚中

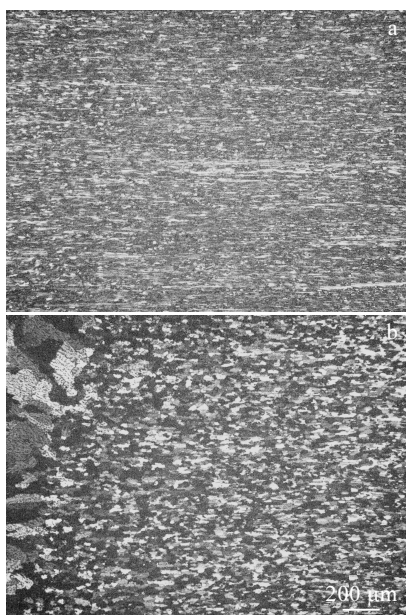


图 4 母材区和热影响区显微组织

Fig.4 Microstructures of base metal zone (a) and heat-affected zone (b)

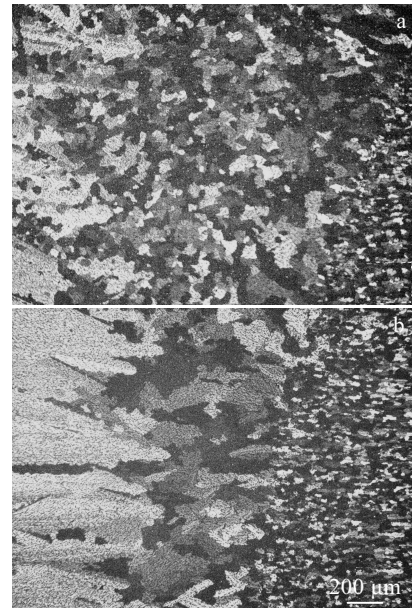


图 5 近熔合线处显微组织

Fig.5 Microstructure of the weld near the fusion line: (a) near the weld toe and (b) near the middle of the slab thickness

间的显微组织。这种等轴晶区的形成是一个形核和长大的过程, 主要是母材中高熔点的细小第二相颗粒在凝固过程中提供异质形核的核心^[14], 同时存在较大的过冷度^[15]。等轴晶粒的大小与温度场有很大关系。焊接过程中熔池呈“双喇叭口”形, 在焊缝厚度方向的上、中、下 3 个区域各自的散热条件不同, 中间部位的温度最高^[16], 导致残留的第二相颗粒最少, 而上下部分温度相对较低, 残留的第二相颗粒相对较多。所以在焊缝正面靠近焊趾处的熔合线附近的等轴晶数量和范围比板厚中间的大, 且等轴晶晶粒尺寸比板厚中间部分小。而焊缝上、下部分组织存在着较大差异是由于熔池的流动造成的。

焊缝的显微组织如图 6 所示。图 6a 为初生的胞状树枝晶的显微组织, 图 6b 为胞状树枝晶中间区域的显微组织, 图 6c 为焊缝中心胞状树枝晶交叉处的显微组织。从图中可以观察到, 焊缝熔合线处为粗大的等轴晶组织, 随着冷却条件的变化, 沿着原等轴晶的生长方向以胞状树枝晶的形式向焊缝内部生长。因为等轴晶的生长方向不同, 所以胞状树枝晶的初始生长方向也是杂乱无规律的, 不同方向上的晶粒成长趋势各不相同, 最优结晶取向和导热最快的方向相一致的胞状树枝晶生长最快而优先长大, 取向不一致的晶粒只能长到一定尺寸而终止。从图 6b 便可以观察到有些胞状树枝晶的生长被截断。最终胞状树枝晶从两侧以一定

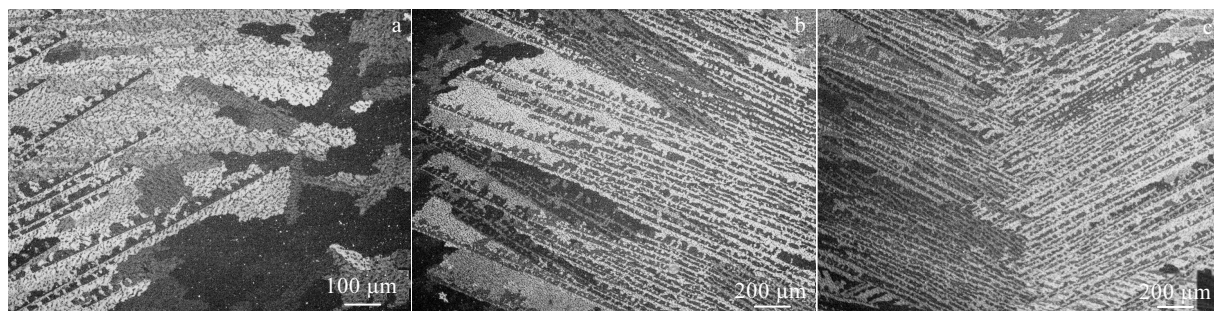


图 6 焊缝显微组织

Fig.6 Microstructures of the weld: (a) primary cellular dendrites, (b) middle of cellular dendrites, and (c) weld center

角度呈对称生长并在焊缝中心处相遇。

2.4 断口金相分析

在力学性能试验中, 根据拉伸试样的宏观断裂图初步确定拉伸试样的断裂位置基本位于焊缝区靠近熔合线处。为了进一步确定断裂位置, 对焊接接头拉伸试样的断口进行显微组织分析。图 7 所示为焊接接头拉伸试样断裂位置处的显微组织。图 7a 为焊缝侧的显微组织, 图 7b 为母材侧的显微组织。由图可以确定拉伸断裂位置在焊缝近熔合线的等轴晶组织处, 断裂形式也基本为沿晶断裂。熔合线外侧的热影响区再结晶组织和内侧的焊缝等轴晶组织在成分分布、晶粒大小、组织形态上有显著差异, 造成力学性能的不均匀性, 导致该位置成为整个焊接接头的薄弱区域。

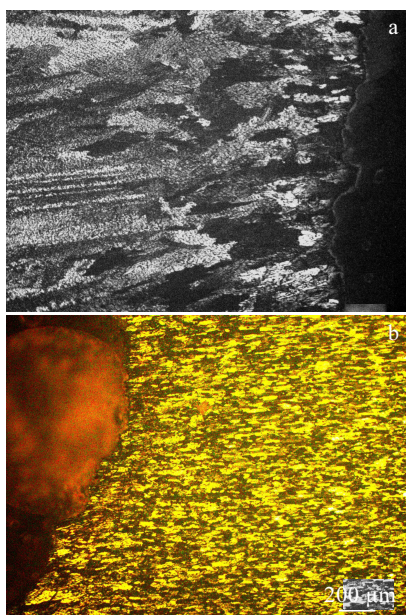


图 7 断裂处显微组织

Fig.7 Microstructure of fracture: (a) the side of weld metal and (b) the side of base metal

从硬度图上看, 焊缝中心胞状树枝晶相交的区域也是接头力学性能的薄弱区域, 但由于胞状组织的方向性生长, 造成此类组织在沿着生长方向上的力学性能远好于垂直方向, 而横向拉伸试验中受力方向基本是沿着胞状晶生长方向; 另一方面, 从图 6c 中也可以看到胞状树枝晶相交处晶粒主干相互交叉, 成一定角度“啮合”在一起, 并没有形成截然分离的界面, 因此横向力学性能仍处于较高水平。

2.5 微区成分分析

为了进一步分析焊缝靠近熔合线处断裂的原因, 采用电子探针对 5083 铝合金等离子立焊焊接接头中熔合线处的主要强化元素 Mg 进行了面扫描。图 8 所

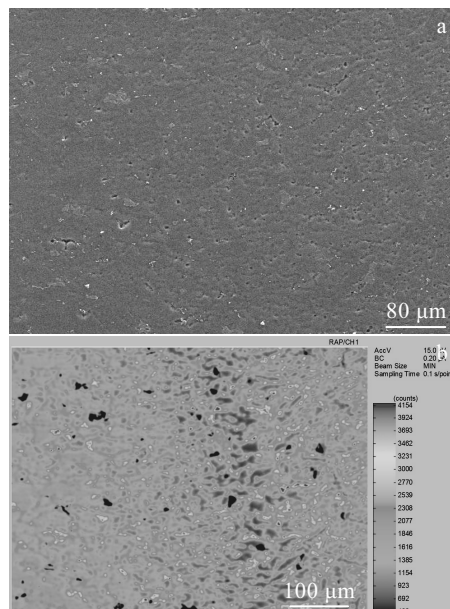


图 8 近熔合线处 EPMA 分析

Fig.8 EPMA analysis near the fusion line: (a) secondary electron image and (b) spectral intensity distribution of Mg elements

示为近熔合线处二次电子像图和对应位置的 Mg 光谱强度分布图, 图中所示左侧为母材区, 右侧为焊缝区。从图中观察到靠近母材的一侧 Mg 分布相对均匀, 而在焊缝边界靠近熔合线约 0.2 mm 宽度的区域内 Mg 含量偏低, 且分布不均匀。

5083 合金中铝和镁为主要合金元素, 结合 Al-Mg 二元相图可知, 随着温度降低从液态金属中首先析出 α -Al 相。由于熔合线处温度梯度大、散热快, 而 Mg 元素随温度的降低溶解度急剧下降, 造成先析出相的固态前沿发生 Mg 元素富集, 随着在晶界处生成非平衡共晶组织, 造成 Mg 元素在晶界处偏析。Mg 的严重偏析位置是接头最薄弱的区域, 接头断裂一般发生在该区域。

3 结 论

1) 变极性等离子立焊可实现对 5083 铝合金的焊接, 焊缝熔合良好, 组织致密, 抗拉强度的平均值为 295 MPa, 力学性能良好。

2) 变极性等离子焊接头硬度呈“V”型分布, 焊缝中心硬度最低, 焊缝区域硬度低于热影响区, 而热影响区硬度低于母材区。

3) 5083 铝合金变极性等离子焊接接头的焊缝近熔合线处为粗大的等轴晶组织。中间部分为胞状树枝晶组织, 从两侧呈对称生长并在焊缝中心相遇。热影响区发生回复再结晶。

4) 焊缝近熔合线处的等轴晶组织的 Mg 元素含量较其他区域偏低且分布极不均匀, 在晶内贫镁而晶界出现镁的富集。Mg 的成分偏析和组织不均匀造成该位置成为接头中力学性能最薄弱的部位。

参考文献 References

- [1] Staige R A M P, Pietaka A M. *Biomaterials*[J], 2006, 27(9): 1728
- [2] Jian Haigen(蹇海根), Tang Xianmin(唐娴敏), Ou Ling(欧玲) *et al. Rare Metal Material and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(2): 415
- [3] Yan Dejun(闫德俊), Han Duanfeng(韩端锋), Wang Yi(王毅) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属

学报)[J], 2016, 26(10): 2066

- [4] Huang Yong(黄勇), Fan Ding(樊丁). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2008, 29(1): 46
- [5] Yang Haifeng(杨海峰), Liang Xiaomei(梁晓梅), Wang Jixiao(王吉孝) *et al. Welding & Joining*(焊接)[J], 2016(6): 18
- [6] Chang Liyan(常丽艳), Song Xiping(宋西平), Li Hongliang(李宏良) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2014, 35(9): 25
- [7] Zeng Ping(曾平). *Ship and Ocean Engineering*(船海工程)[J], 2010, 39(1): 55
- [8] Jiang Yi(姜祎), Xu Binshi(徐滨士), Lv Yaohui(吕耀辉) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2010, 31(11): 17
- [9] Han Yongquan(韩永全), Du Maohua(杜茂华), Chen Shujun(陈树君) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2010, 31(11): 93
- [10] Zhang Qinlian(张勤练), Yang Chunli(杨春利), Lin Sanbao(林三宝) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2013, 34(9): 80
- [11] Jiang Yi(姜祎), Liu Ming(刘明), Lv Yaohui(吕耀辉) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2014, 35(10): 26
- [12] Liu Liming(刘黎明), Shen Yong(沈勇), Zhang Zhaodong(张兆栋). *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2006, 42(5): 199
- [13] Li Guowei(李国伟), Han Yongquan(韩永全), Chen Furong(陈芙蓉) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2015, 36(10): 6
- [14] Yu Aiwu(余爱武), Yang Chenggang(杨成刚), He Peng(何鹏) *et al. Rare Metal Material and Engineer*(稀有金属材料与工)[J], 2016, 45(3): 760
- [15] Xu Lianghong(许良红), Tian Zhiling(田志凌), Peng Yun(彭云) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2008, 35(3): 457
- [16] Lei Yucheng(雷玉成), Zheng Huijin(郑惠锦). *Journal of Jiangsu University of Science and Technology, Natural Science Edition*(江苏理工大学学报, 自然科学版)[J], 2000, 21(10): 61

Microstructure and Mechanical Properties of Variable Polarity Plasma Arc Welded Joints of 5083 Aluminum Alloy for Shipbuilding

Yan Dejun¹, Li Haiyang², Liu Xiaoli¹, Zhong Meida¹, Luo Jiuqiang¹, Liang Zhimin²

(1. Guangdong Key Laboratory of Enterprise Advanced Welding Technology for Ships,

CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Co., Ltd, Guangzhou 510715, China)

(2. Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: A5000 series (Al-Mg) aluminum alloy with a thickness of 5 mm for shipbuilding was successfully welded by a variable polarity plasma welding process in a vertical-up position. The microstructure and mechanical properties of the joint were investigated. The ultimate tensile strength of the joint is 295 MPa, the elongation is 10%, and the location of fracture is near the fusion line. The micro hardness of the weld zone and heat affected zone is lower than that of the base metal, and the lowest hardness appears at the center of the weld. The optical micrographs of the joint show that the weld microstructure near the fusion line is a coarse equiaxed grain structure, and most of the weld region is a cellular dendritic structure growing from the two sides to the center, while the microstructure of the heat affected zone is a typical recrystallized structure. The composition around the tensile fracture was analyzed by EPMA, and the results reveal that the content of Mg is low and heterogeneously distributed. The lack and segregation of Mg and non-homogeneous microstructure decrease solution strengthening, resulting in weak areas of the joint.

Key words: 5083 aluminum alloy; variable polarity plasma welding; microstructure; mechanical property

Corresponding author: Yan Dejun, Ph. D, Senior Engineer, Guangdong Key Laboratory of Enterprise Advanced Welding Technology for Ships, CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Co., Ltd, Guangzhou 510715, P. R. China, Tel: 0086-20-82096191, E-mail: yandejun_2003@163.com