DOI：10.7512/j.issn.1001-2303.2022.11.08

5A06铝合金GMAW熔透接头组织与性能对比研究

姚尚坤[1]，冯曰海[1]，黄　俊[1]，王立新[2]，赵斌彬[1]

1. 南京理工大学 材料科学与工程学院，江苏 南京 210094
2. 内蒙古第一机械集团股份有限公司 工艺研究所，内蒙古 包头 014010

摘　要：针对5A06铝合金薄壁油箱焊缝形式多样、焊接效率低、难以实现焊接自动化等问题，采用AC-CMT、CMT、P-MIG和CMT+P四种GMAW工艺进行试验，并对比研究了四种工艺下的焊缝成形特征、气孔分布、显微组织和接头性能。结果表明，P-MIG接头的正面余高最小，熔透时所需热输入最低，焊缝纵截面和横截面观察区域内尺寸为10~100 μm的气孔数量均最少；四种工艺接头焊缝区的显微组织均由α-Al基体和β-Al_3Mg_2析出相构成，相较于AC-CMT与CMT工艺，P-MIG与CMT+P接头焊缝区晶粒尺寸较大，热影响区宽度较宽；P-MIG接头抗拉强度最高（318 MPa），为母材的89.1%，且接头弯曲到180°时未开裂；P-MIG和AC-CMT拉伸断口无气孔，CMT与CMT+P接头拉伸与弯曲断口均可明显观察到较多气孔。综合比较，气孔最少、抗拉强度最高和弯曲性能较好的P-MIG工艺更加适合5A06铝合金薄壁油箱的机器人自动化焊接。

关键词：5A06铝合金；焊接工艺；显微组织；气孔；弯曲性能；机器人焊接

中图分类号：TG457.14　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-2303（2022）11-0052-09

Comparative Study on Microstructure and Properties of 5A06 Aluminum Alloy Full-penetration Joint with Gas Metal Arc Welding Process

YAO Shangkun[1], FENG Yuehai[1], HUANG Jun[1], WANG Lixin[2], ZHAO Binbin[1]

1. School of Materials and Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China
2. Technology Research Institute, Inner Mongolia First Machinery Group Company Limited, Baotou 014010, China

Abstract: In order to solve the problems of the various weld forms, low welding efficiency and difficult to achieve welding automation of 5A06 aluminum alloy thin-walled fuel tank, four GMAW welding processes AC-CMT, CMT, P-MIG and CMT+P were studied. The difference in weld forming characteristics, pore distribution, microstructure, and joint properties of the four processes were compared and studied. The results show that the front reinforcement of the joint, the energy input required for penetration, and the number of pores in longitudinal and transverse section with P-MIG is the lowest. The microstructure of the weld zone of four process joints consisted of α-Al matrix and β-Al_3Mg_2, compared with AC-CMT and CMT processes, the grain size in the weld zone of P-MIG and CMT+P joints is larger and the width of heat affected zone is wider. The mechanical property test shows that the tensile strength of P-MIG joint is the highest (318 MPa), which is 89.1% of the base metal, and the joint still does not crack when the bending angle is 180° with P-MIG. SEM observation show that the tensile fracture surfaces does not exist pore with P-MIG and AC-CMT, and more pores could be observed on the tensile and bending fracture surfaces of CMT and CMT+P joints. By comprehensive comparison, the P-MIG process has the least pores, the highest tensile strength and better bending performance, which is more suitable for the robot automatic welding of 5A06 aluminum alloy thin-walled fuel tank.

Keywords: 5A06 aluminum alloy; welding process; microstructure; pore; bending properties; robot welding

* **收稿日期：**2022-04-17
基金项目：国防创新项目（17-H863）
作者简介：姚尚坤（1996—），男，硕士，主要从事铝合金自动化焊接工艺的研究。

引用格式：姚尚坤，冯曰海，黄俊，等. 5A06铝合金GMAW熔透接头组织与性能对比研究[J]. 电焊机，2022，52(11)：52-60.
Citation: YAO Shangkun, FENG Yuehai, HUANG Jun, et al. Comparative Study on Microstructure and Properties of 5A06 Aluminum Alloy Full-penetration Joint with Gas Metal Arc Welding Process[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(11): 52-60.

0　前言

5A06铝合金具有较高的比强度、良好的耐蚀性和热稳定性[1-3]，在航空航天、汽车、兵器装备等领域中得到了广泛应用。铝合金结构件的高效自动化焊接一直是研究热点，目前铝合金机器人弧焊常采用钨极惰性气体保护焊（TIG）和熔化极惰性气体保护焊（MIG）工艺。TIG焊具有电弧稳定、飞溅少、焊缝成形美观等优点，但效率低及填丝方式使得其空间灵活性差，不适合小批量全位置自动化焊接生产。因此，目前MIG焊仍是铝合金小批量全位置自动化焊接的最佳选择。

为提高接头质量，在传统直流MIG焊基础上发展出了P-MIG焊、CMT焊、AC-CMT焊、CMT+P焊等新的熔化极气体保护焊（GMAW）工艺。P-MIG焊相比传统MIG焊，可以在焊接平均电流低于喷射过渡临界电流的情况下实现熔滴的喷射过渡，同时脉冲能够起到对熔池振荡的作用，有利于熔池中气体的逸出；CMT焊通过协调送丝控制及实时监控实现焊接过程中的冷热循环交替，较传统MIG焊和MAG焊具有无飞溅、稳定、热输入低等优点[4]；交流冷金属过渡焊（AC-CMT）将传统的CMT直流波形变为交流波形，具有更低的热输入，同时可以起到阴极雾化的作用[5-6]；脉冲冷金属过渡焊（CMT+P）是由CMT阶段和脉冲阶段组成，CMT阶段具有较低的热输入，脉冲阶段具有较高的热输入，可以在较高的热输入条件下实现稳定的熔滴过渡，具有更高的热输入调节范围[7]。刘红伟[8]等人分别采用钨极氩弧焊和搅拌摩擦焊对3 mm厚5A06铝合金进行焊接，结果表明，搅拌摩擦焊接头的抗拉强度和疲劳强度都高于钨极氩弧焊接头。陈文静[9]等人采用电子束工艺焊接5A06铝合金，通过优化工艺参数得到了性能良好的焊接接头。目前涉及AC-CMT、CMT、P-MIG及CMT+P四种工艺的5A06铝合金焊接的相关研究较少，仅局限于某一方面的研究，如仅针对气孔或组织及性能展开的相关研究，对于不同工艺特点的研究不够深入全面，无法满足工程应用的实际需要。

本文采用P-MIG、CMT、AC-CMT和CMT+P四种焊接工艺对5A06铝合金进行试验研究，深入对比分析不同工艺下获得的接头的成形特征、气孔分布、显微组织和力学性能，找出不同工艺对接头气孔分布、显微组织和力学性能的影响规律，揭示不同工艺之间的区别及应用特点，为实现5A06铝合金薄壁油箱高效高质的自动化焊接提供工艺基础。

1　试验材料及方法

1.1　试验材料与设备

试验母材为5A06铝合金，试板尺寸300 mm×100 mm×3 mm，焊接材料采用直径1.2 mm的ER5356焊丝，母材与焊丝的化学成分如表1所示，保护气体采用纯度≥99.99%的纯氩。接头形式为对接接头，I型坡口，坡口间隙1.0 mm，如图1所示。试验设备为IRB 1410-5/1.45型号的ABB工业弧焊机器人和CMT Advance 4000R的焊机。采用DSO-X4024型示波器采集焊接电流和电压，AC-CMT、CMT、CMT+P工艺的电弧热效率取0.8[10]，P-MIG工艺取0.7[11]。通过前期工艺试验，在保证熔透和焊缝成形良好的条件下，选取4种不同焊接工艺参数，如表2所示。

表1　母材及焊丝化学成分（质量分数，%）

Table 1　Chemical composition of base metals and filler wires（*wt.* %）

材料	Mg	Si	Cu	Zn
5A06	5.80~6.80	≤0.4	≤0.1	≤0.2
ER5356	4.5~5.5	0.25	0.1	0.1

材料	Ti	Cr	Mn	Fe	Al
5A06	0.02~0.10	—	0.50~0.80	≤0.4	余量
ER5356	0.06~0.2	0.05~0.2	0.05~0.2	0.4	余量

1.2　试样制备和检测

焊接后沿焊缝垂直方向制取拉伸试样、弯曲试样和金相试样，拉伸试样及弯曲试样尺寸如图2所示。对金相试样进行研磨抛光，抛光后采用2.5%的氟硼酸水溶液电解腐蚀90 s左右，在MR5000光学

表2 5A06铝合金焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters of 5A06 aluminum alloy

焊接工艺	送丝速度/(m·min^{-1})	焊接速度/(mm·s^{-1})	焊接电压/V	焊接电流/A	热输入/(J·cm^{-1})	焊丝干伸长/mm	气体流量/(L·min^{-1})
AC-CMT	8.4	11	11.3	126	1 035	12	25
CMT	5.4	11	14.2	105	1 084	12	25
P-MIG	5.0	11	16.8	83	887	12	25
CMT+P	5.0	11	17.4	94	1 190	12	25

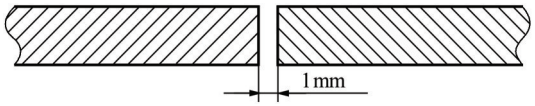
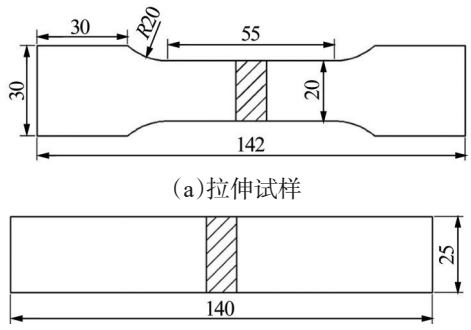


图1 焊接接头示意

Fig. 1 Schematic diagram of welded joints

显微镜下观察接头的宏观形貌及显微组织；在室温下采用型号为CSS-44100的电子万能试验机进行拉伸和弯曲试验，拉伸试验加载速率为2 mm/min，弯曲试验时压头直径为15 mm，辊筒跨距为24 mm，辊筒直径为30 mm；采用Quanta 250F扫描电镜对拉伸及弯曲断口进行观察。



(a)拉伸试样

(b)弯曲试样

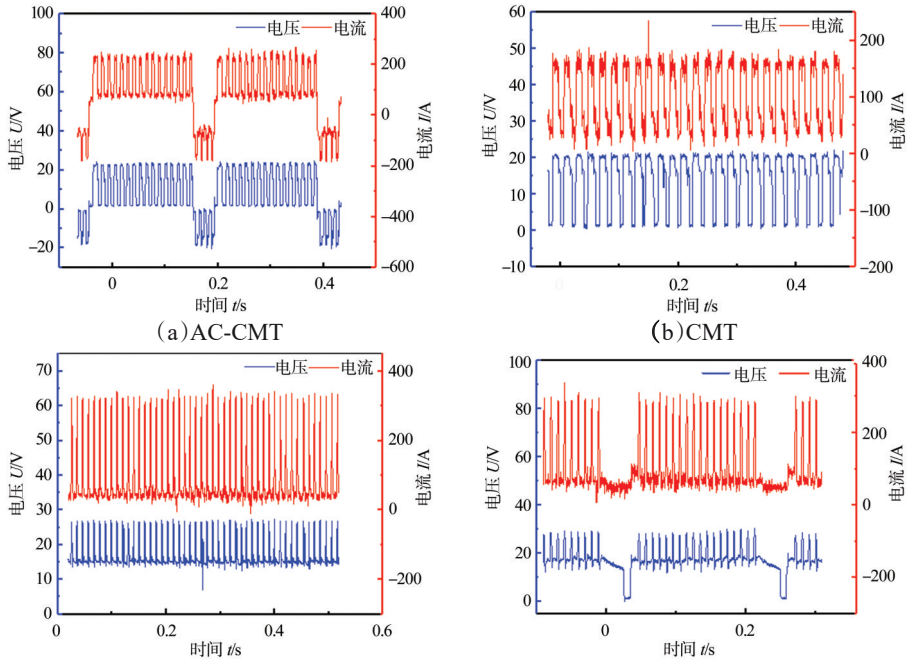
图2 拉伸和弯曲试样尺寸

Fig. 2 Dimensions of tensile and bending specimens

2 试验结果与分析

2.1 实现对接熔透态的不同工艺热输入分析

四种工艺下实际测量的电流电压波形如图3所示。图3a、3b为典型的CMT波形，熔滴均为短路过渡。图3c为典型的脉冲电流电压波形，熔滴过渡为射滴过渡。图3d为CMT+P工艺下电流电压波形，由脉冲波形和CMT波形组成，在脉冲阶段熔滴过渡为射滴过渡，CMT阶段熔滴过渡为短路过渡。由于



(a)AC-CMT (b)CMT

(c)P-MIG (d)CMT+P

图3 不同焊接工艺下实测的电流电压波形

Fig. 3 Voltage and current waveform with different processes

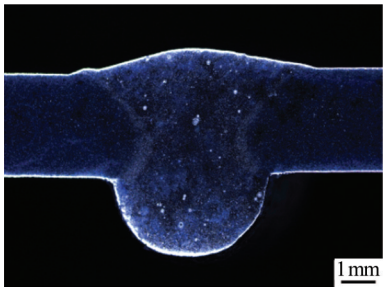
射滴过渡时电流较大，熔滴过渡到熔池中温度较高，造成熔池温度较高，而短路过渡时，熔滴在接触到熔池时电流迅速降低，使得熔滴过渡到熔池中温度较低[12]，因此相比 AC-CMT、CMT 和 CMT+P 工艺，在相同送丝速度下，P-MIG 工艺下熔池温度较高，熔透时所需热输入较小。同时由表 2 可知，AC-CMT、CMT 和 CMT+P 实现完全熔透所需热输入分别为 1 035 J/cm、1 084 J/cm 和 1 190 J/cm，P-MIG 需要的热输入相对更小，为 887 J/cm。

2.2　不同工艺下焊缝熔透成形特点对比分析

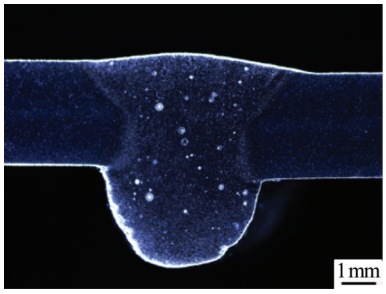
不同工艺下的焊缝宏观形貌如图 4 所示，焊缝横截面尺寸如表 3 所示。由表 3 可知，AC-CMT 正面熔宽最大，为 6.90 mm，P-MIG 正面熔宽最小，为 5.64 mm，相差 18.3%；CMT 背面熔宽最大，为 4.67 mm，P-MIG 背面熔宽最小，为 3.93 mm，相差 15.8%；AC-CMT 正面余高最大，为 0.73 mm，P-MIG 正面余高最小，为 0.24 mm，相差 67.1%；CMT 背面余高最大，为 2.57 mm，P-MIG 背面余高最小，为 2.13 mm，相差 17.1%。分析认为，不同工艺的正面余高相差较大是因为 P-MIG 工艺下送丝速度较慢，在相同的焊接速度下焊丝熔化量较少，同时结合图 3 的分析可知，P-MIG 工艺下熔滴过渡为射滴过渡，熔滴存在较大的向下冲击力，使得熔池内金属液向下流动，因此 P-MIG 工艺下正面余高较低。而 AC-CMT、CMT 工艺送丝速度较快且熔滴过渡为短路过渡，CMT+P 工艺在 CMT 阶段熔滴过渡为短路过渡，熔滴在与熔池接触时焊丝迅速回抽，减少了对熔池的冲击力，熔池内金属液向下流动较少，使得焊缝正面余高较高。

2.3　不同工艺下焊缝气孔分布特征

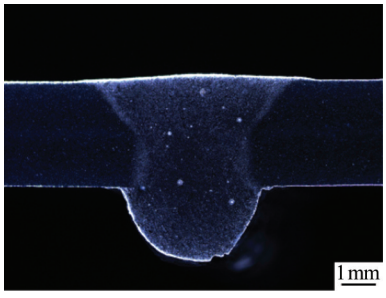
四种工艺下的焊缝纵截面和横截面上气孔分布如图 5 所示。可以看出，P-MIG 工艺下仅在焊缝中部分布着几个尺寸较小的气孔（见图 5c），AC-CMT 与 CMT+P 焊缝纵截面与横截面气孔较 P-MIG 工艺明显增多（见图 5a、5d），CMT 工艺下焊缝纵截面及横截面上气孔分布更为密集（见图 5b），且在观察区域内纵截面和横截面上均有分布。分别对横、纵截面上气孔分布进行统计，焊缝纵截面长度 30 mm、宽度（焊缝熔深）3.4 mm（面积 102 mm^2），横截面则重点针对焊缝区腰部区域（面积 9.1 mm^2），结果如图 6 所示。在焊缝纵截面上（见图 6a），四种工艺下焊缝均



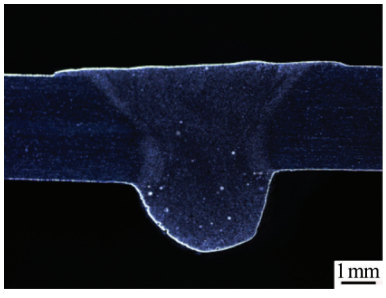
（a）AC-CMT



（b）CMT



（c）P-MIG



（d）CMT+P

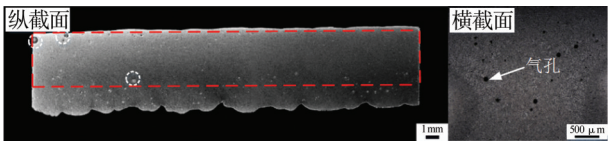
图 4　不同工艺下焊缝宏观形貌

Fig. 4　Macro morphology of weld with different processes

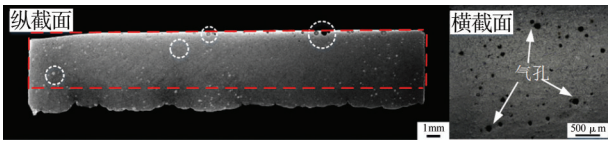
表 3　四种工艺焊缝横截面尺寸

Table 3　Dimensions of weld transverse section with four processes

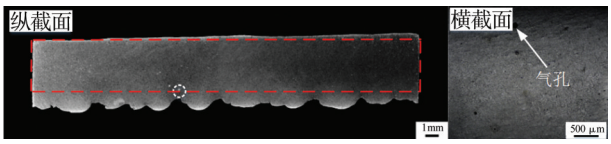
焊接工艺	正面熔宽 /mm	背面熔宽 /mm	正面余高 /mm	背面余高 /mm
AC-CMT	6.90	4.66	0.73	2.25
CMT	6.23	4.67	0.57	2.57
P-MIG	5.64	3.93	0.24	2.13
CMT+P	6.05	3.94	0.33	2.20



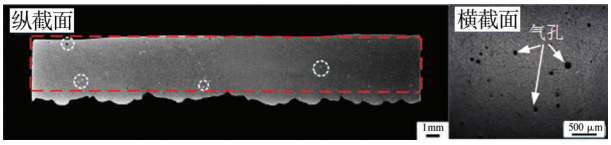
(a)AC-CMT



(b)CMT



(c)P-MIG



(d)CMT+P

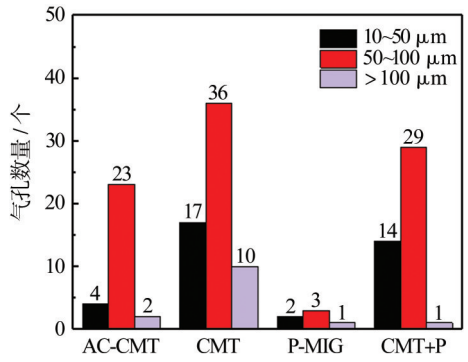
图5　不同工艺下焊缝纵截面与横截面气孔

Fig. 5　Pores of weld longitudinal section and transverse section with different processes

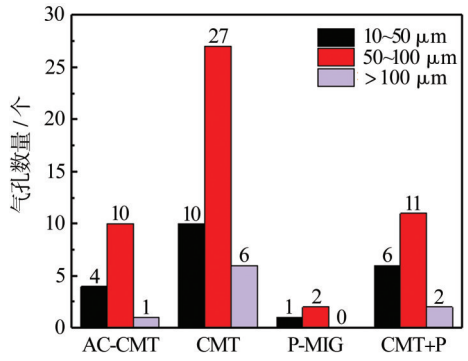
分布着尺寸为10~100 μm的气孔，大于100 μm的气孔较少。P-MIG工艺尺寸在10~50 μm和50~100 μm的气孔分别为2个和3个，而尺寸大于100 μm的气孔仅1个，为四种工艺中最少的；CMT工艺下焊缝气孔尺寸在10~50 μm和50~100 μm的分别为17个和36个，而尺寸大于100 μm的气孔高达10个，为四种工艺中最多的。在焊缝横截面上(见图6b)，P-MIG工艺下焊缝仅有3个尺寸在10~100 μm的气孔；相比于P-MIG工艺，AC-CMT和CMT+P工艺下焊缝气孔数量有所增多，尺寸在10~50 μm的气孔分别为4个和6个，50~100 μm的气孔分别为10个和11个，大于100 μm分别为1个和2个；而CMT工艺下尺寸在10~50 μm和50~100 μm焊缝气孔分别为10个和27个，尺寸大于100 μm的气孔有6个，为四种工艺中最多的。综上，P-MIG工艺下焊缝纵横截面气孔数量均为最少。这是因为在P-MIG工艺中，脉冲对熔池能够起到振荡作用，加速熔池气体逸出，从而减少焊缝中的气孔数量。

2.4　不同工艺下接头的显微组织

四种工艺下接头熔合线附近显微组织如图7所



(a)纵截面气孔统计



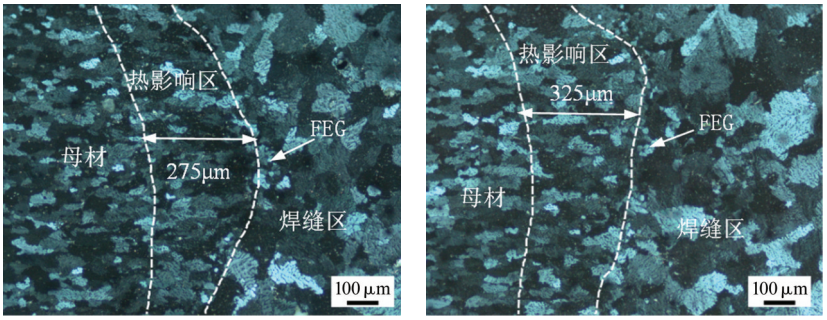
(b)横截面气孔统计

图6　不同工艺下气孔分布

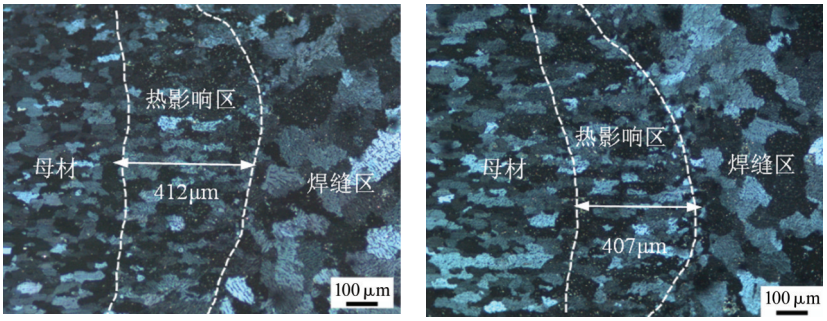
Fig. 6　Pores distribution with different processes

示。由图可知，四种工艺下接头BM区均为等轴晶，且晶粒均较为细小。由图7a、7b可知，AC-CMT与CMT工艺下的HAZ均为等轴晶，HAZ宽度分别为275 μm、325 μm；由图7c、7d可知，P-MIG与CMT+P工艺下的HAZ也同样为等轴晶，但晶粒更为粗大，HAZ宽度分别为412 μm、407 μm，相较AC-CMT与CMT工艺有所增加。结合图3分析可知，相较于P-MIG与CMT+P工艺，AC-CMT与CMT工艺下的熔滴过渡为短路过渡，熔滴在接触到熔池时电流接近零，熔池温度较低，从而使得AC-CMT与CMT工艺下的HAZ区宽度相对较小。同时在图7a、7b的熔合线靠近焊缝区侧发现了细小的等轴晶(FEG)。分析认为AC-CMT与CMT工艺下熔池温度较低，且在熔合线处冷却速度较快，使晶粒生长时间较短，进而形成了细小的等轴晶。

图8为四种工艺下焊缝中心在偏光模式及明场模式下所拍摄的显微组织。从偏光模式下的显微组织可以看出，四种工艺下焊缝中心均为形状规则的等轴晶且晶粒大小有明显差异。AC-CMT与



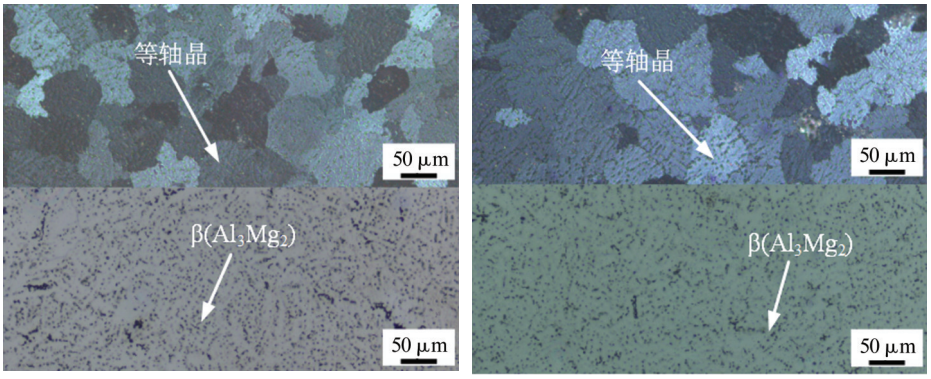
（a）AC-CMT　　（b）CMT



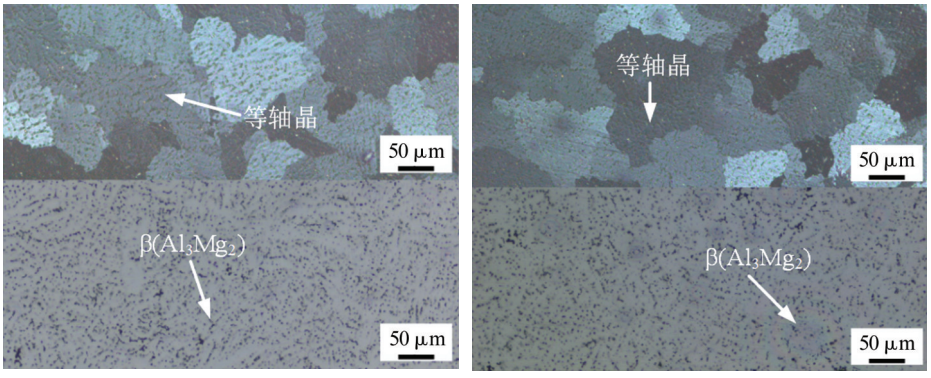
（c）P-MIG　　（d）CMT+P

图 7　不同工艺下熔合线附近组织

Fig. 7　Microstructure of fusion line boundary with different processes



（a）AC-CMT　　（b）CMT



（c）P-MIG　　（d）CMT+P

图 8　不同工艺下焊缝区显微组织

Fig. 8　Microstructure of weld zone with different processes

CMT 接头 WZ 晶粒较为细小(见图 8a、8b),晶粒平均直径分别为 81.04 μm、87.12 μm;P-MIG 与 CMT+P 接头 WZ 晶粒较为粗大(见图 8c、8d),晶粒平均直径分别为 129.28 μm、121.35 μm。可见 AC-CMT 接头 WZ 区晶粒最为细小,而 P-MIG 接头 WZ 区晶粒最为粗大。这主要是因为 P-MIG 工艺下熔滴过渡为射滴过渡,电流较大,所形成的熔滴温度较高,造成熔池中的温度较高,从而导致形成的晶粒较为粗大。由明场模式下显微组织可知,四种工艺下 WZ 组织均以 α-Al 固溶体为主,在 α-Al 基体上弥散分布着大量呈点状的析出相 β-Al_3Mg_2。

2.5 拉伸性能对比分析

母材和四种 GMAW 工艺下接头拉伸试验断裂后的试样照片如图 9 所示,接头均断裂在焊缝中心区域。母材和四种工艺下接头拉伸性能测试结果如图 10 所示。可以看出,母材平均抗拉强度为 357 MPa,断后延伸率 20.2%。在四种工艺中,接头抗拉强度分别为:P-MIG 最高,为 318 MPa,为母材的 89.1%,断后延伸率 14.6%;CMT 最低,为 286 MPa,为母材的 80.1%,断后延伸率 11%;AC-CMT 为 312 MPa,为母材的 87.4%,断后延伸率 13.6%;CMT+P 为 302 MPa,为母材的 84.6%,断后延伸率 12.7%。接头拉伸断口形貌如图 11 所示,四种工艺下的拉伸断口均分布着

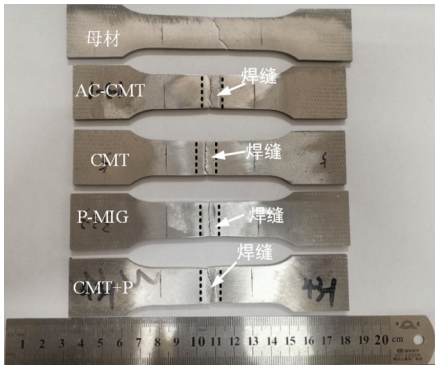


图 9 拉断后试样

Fig. 9 Specimens after tensile failure

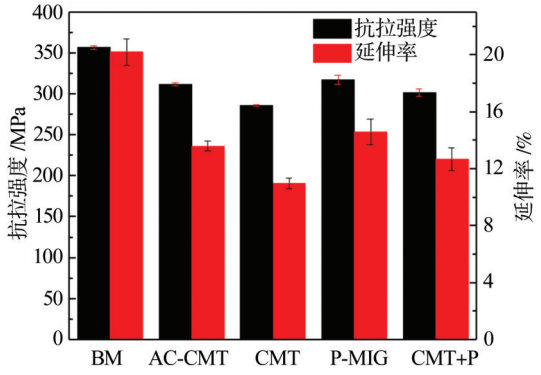
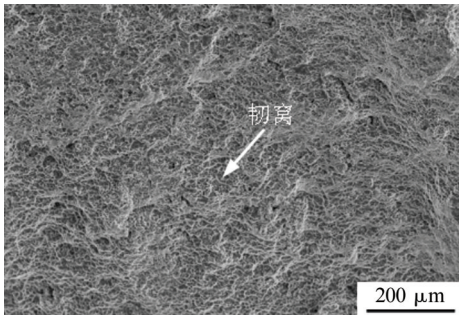
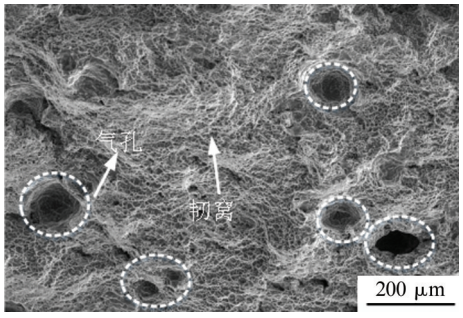


图 10 试样抗拉强度

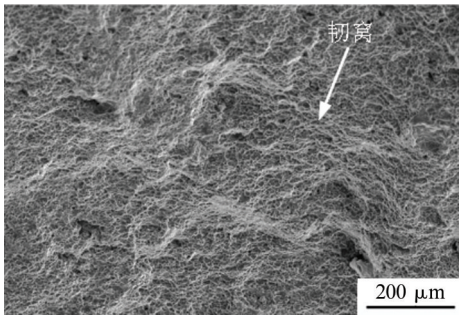
Fig. 10 Ultimate tensile strength of the specimens



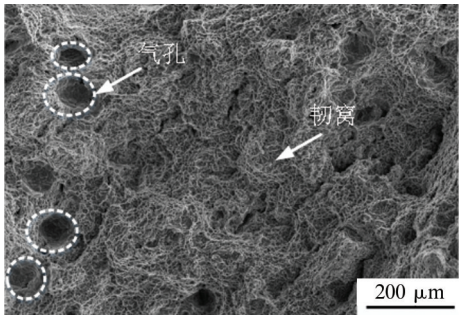
(a)AC-CMT



(b)CMT



(c)P-MIG



(d)CMT+P

图 11 不同工艺下接头拉伸断口形貌

Fig. 11 Fracture morphology of tensile specimens with different processes

细小的韧窝，为典型的韧性断裂。相较于其他三种工艺，P-MIG 工艺的韧窝尺寸细小（见图 11c），分布密集，且没有气孔，因此 P-MIG 工艺的接头抗拉强度较高，与测试结果一致。由图 11b、11d 可知，CMT 工艺的拉伸断口上分布着 5 个 50~100 μm 的气孔，CMT+P 工艺下拉伸断口上分布着 4 个 50~100 μm 的气孔，在拉伸过程中容易引起应力集中，是裂纹产生的主要源头，严重降低接头的抗拉强度，因此 CMT 与 CMT+P 工艺下接头抗拉强度较低。

2.6　弯曲性能对比分析

根据 GB/T 2653—2008 弯曲试验方法评定接头弯曲性能。四种工艺下接头正面与背面弯曲后的试样如图 12 所示，AC-CMT 与 P-MIG 工艺下接头正面与背面的弯曲角度均为 180°，CMT 工艺下接头正面与背面弯曲角分别为 53.5°和 56°，CMT+P 工艺下接头正面与背面弯曲角分别为 75°、84°。由图 12 可知，AC-CMT 与 P-MIG 工艺的接头表面未出现裂纹，弯曲性能良好；CMT 与 CMT+P 工艺的接头在弯曲过程中表面均出现长度超过 3 mm 的裂纹，弯曲性能较差。CMT 与 CMT+P 工艺下接头弯曲断口形貌如图 13 所示。可以看出，CMT 弯曲断口上分布着 7 个 50~100 μm 的气孔，CMT+P 弯曲断口上分布着 4 个 50~100 μm 的气孔。分析认为，正是气孔的存在导致 CMT 与 CMT+P 工艺下接头弯曲性能较差，CMT 工艺下弯曲断口气孔数量多于 CMT+P，使得 CMT 工艺下接头的弯曲角小于 CMT+P 工艺。

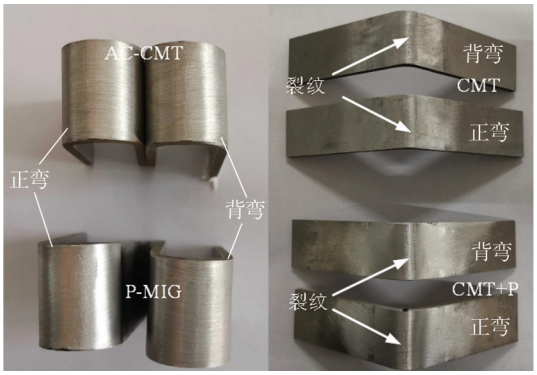
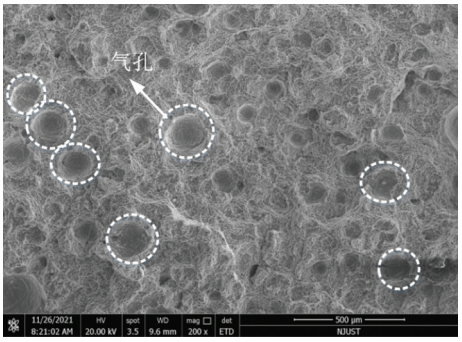
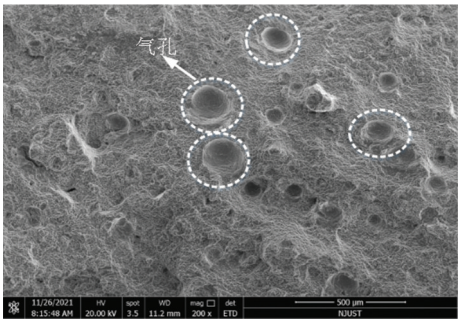


图 12　不同工艺下接头弯曲形状

Fig. 12　Bending shape of joint with different processes



（a）CMT



（b）CMT+P

图 13　弯曲试样断口形貌

Fig. 13　Bending fracture morphology

3　结论

（1）在实现对接接头完全熔透的情况下，相比于 AC-CMT、CMT 和 CMT+P 工艺，P-MIG 工艺的熔滴过渡为射滴过渡，熔池温度更高，正面余高更低，熔透时所需热输入更小。

（2）P-MIG 工艺下，焊缝横截面观察区域内 10~50 μm 和 50~100 μm 气孔数量分别为 1 个和 2 个，焊缝纵截面上仅发现 1 个尺寸大于 100 μm 的气孔，相比于 AC-CMT、CMT 和 CMT+P 三种工艺，P-MIG 工艺下焊缝气孔数量最少。

（3）相比 P-MIG 与 CMT+P 工艺，AC-CMT 与 CMT 工艺焊缝区晶粒尺寸较小，热影响区宽度较窄；四种工艺下接头焊缝区的显微组织均由 α-Al 和 β-Al_3Mg_2 析出相构成。

（4）P-MIG 工艺下接头抗拉强度为 318 MPa，为母材强度的 89.1%，相比 AC-CMT、CMT 和 CMT+P 工艺，抗拉强度最高，SEM 观察发现四种工艺下接头断裂形式均为韧性断裂，CMT 与 CMT+P 接头断口气孔较多。相比于 CMT 与 CMT+P 工艺在弯曲过程中接头表面出现裂纹，AC-CMT 与 P-MIG 工艺下接头均可以弯曲到 180°，且接头表面无裂纹。

总的来看，相比于 AC-CMT、CMT 和 CMT+P 工

艺，P-MIG工艺下接头具有最少的气孔分布、最高抗拉强度和较好的弯曲性能，更加适合5A06铝合金薄壁油箱机器人自动焊。

参考文献：

[1] GUO N，FU Y L，WANG Y Z，et al. Microstructure and mechanical properties in friction stir welded 5A06 aluminum alloy thick plate[J]. Materials and Design，2017，113：273–283.

[2] 黄浩，周洪刚，耿洋茉，等. 直流双脉冲MIG焊对5A06铝合金焊缝组织和性能的影响[J]. 电焊机，2020，50(6)：100–104.
HUANG H，ZHOU H G，GENG Y M，et al. Effect of DC double-pulse MIG welding on Microstructure and properties of 5A06 aluminum alloy weld[J]. Electric Welding Machine，2020，50(6)：100–104.

[3] 高彦军，杨君，吴东，等. 5A06-O铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头微观组织和力学性能[J]. 热加工工艺，2021，50(1)：25–29.
GAO Y J，YANG J，WU D，et al. Microstructure and mechanical properties of 5A06-O aluminum alloy joints prepared by bobbin-tool friction stir welding. Hot Working Technology，2021，50(1)：25–29.

[4] HUAN P C，WANG X N，ZHANG J，et al. Effect of wire composition on microstructure and properties of 6063 aluminium alloy hybrid synchronous pulse CMT welded joints[J]. Materials Science and Engineering：A，2020，790：139713.

[5] WANG P，HU S S，SHEN J Q，et al. Effects of electrode positive/negative ratio on microstructure and mechanical properties of Mg/Al dissimilar variable polarity cold metal transfer welded joints[J]. Materials Science and Engineering：A，2016，652：127–135.

[6] 张瑞英，穆森，王军. 铝合金薄板交流CMT焊接过程能量分配研究[J]. 电焊机，2013，43(6)：22–26.
ZHANG R Y，MU S ，WANG J. Research on energy distribution of AD CMT advanced welding with aluminum alloy sheet[J]. Electric Welding Machine，2013，43(6)：22–26.

[7] LI J J，SHEN J Q，HU S S，et al. Microstructure and mechanical properties of 6061/7N01 CMT+P joints[J]. Journal of Materials Processing Technology，2019，264：134–144.

[8] 刘红伟，王法科，王冬生，等. 5A06铝合金焊接接头性能研究[J]. 兵器材料科学与工程，2009，32(2)：72–75.
LIU H W，WANG F K，WANG D S，et al. Research on welding joint properties of 5A06 aluminum alloy [J]. Ordnance Material Science And Engineering，2009，32(2)：72–75.

[9] 陈文静，范浩霖，陈群燕. 5A06的焊接工艺与性能[J]. 电焊机，2016，46(3)：148–151.
CHEN W J，FAN H L，CHEN Q Y. 5A06 welding process and property[J]. Electric Welding Machine，2016 46(3)：148–151.

[10] CONG B Q，QI B J，OUYANG R J，et al. Influence of cold metal transfer process and its heat input on weld bead geometry and porosity of aluminum-copper alloy welds [J]. Rare Metal Materials and Engineering，2016，45(3)：0606-0611.

[11] 徐敏，薛家祥，黄雯锦. 铝合金薄板脉冲MIG焊低热输入工艺[J]. 焊接学报，2017，38(6)：110–114.
XU M，XUE J X，HUANG W J. Research on low heat input pulsed MIG welding process for aluminum alloy sheet[J]. Transactions of the China Welding Institution，2017，38(6)：110–114.

[12] 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 H. CMT welding technology of thick aluminum alloy plates for high speed train[J]. Transactions of the China Welding Institution，2015，36(4)：75–78.