

5356焊丝对6061铝合金焊接接头热处理性能的影响

孙彦华¹, 李恒¹, 谭国寅¹, 李家奇²

1. 昆明冶金研究院有限公司 云南昆明 650031

2. 云南铝业股份有限公司 云南昆明 650502

摘要: 为探究国产5356焊丝对6061铝合金焊后热处理性能的影响, 采用惰性气体保护焊(MIG)进行焊接, 后采用固溶处理、固溶+时效处理制备试件。利用显微硬度计、拉伸试验机、扫描电镜(SEM)表征了焊接区域。结果表明: 固溶+时效处理后热影响区硬度达到110HV, 焊接接头强度增加了18.6%、伸长率下降了25%。

关键词: 5356焊丝; 焊接接头; 热处理; 力学性能

Influence of 5356 welding wire on the properties of 6061 aluminum alloy welded joint after heat treatment

SUN Yanhua¹, LI Heng¹, TAN Guoyin¹, LI Jiaqi²

1. Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Kunming 650031, Yunnan, China

2. Yunnan Aluminum Co., Ltd., Kunming 650502, Yunnan, China

Abstract: In order to investigate the influence of domestic 5356 welding wire on the properties of 6061 aluminum alloy after post-weld heat treatment, inert gas shielded welding (MIG) was used for welding. The samples were prepared through solution treatment and solution treatment + aging treatment. The welding area was characterized by microhardness tester, tensile testing machine and scanning electron microscope (SEM). The results show that after solution treatment + aging treatment, the hardness of the heat-affected zone reaches 110HV, the strength of the welded joint increases by 18.6%, and the elongation decreases by 25%.

Keywords: 5356 welding wire; welded joint; heat treatment; mechanical properties

1 序言

铝合金凭借其密度小、比强度高、比刚度高, 以及良好的加工成形性等一系列优良特性, 成为轨

道交通领域轻量化材料的最佳选择^[1, 2]。6061铝合金质量轻、耐腐蚀性能好, 应用广泛, 但其对焊接材料、焊接工艺要求较高^[3]。周新志等^[4]研究了TIG

基金项目: 科技人才与平台计划(202105AD160020); 重大科技专项计划(202302AB080007)。

第一作者: 孙彦华, 正高级工程师, 主要研究方向为有色金属材料加工, E-mail: syh19771108@163.com。

通信作者: 李恒, 高级工程师, 主要研究方向为有色金属材料加工, E-mail: 54716149@qq.com。

焊对6061铝合金焊接接头的显微组织和力学性能的影响。结果表明,在120A时接头抗拉强度和伸长率最好,焊缝成分均匀,生成强化相使焊缝区的硬度达到最大值。康金文等^[5]研究了6061铝合金超音脉冲MIG焊接接头微观组织及力学性能。结果表明,以ER4043铝合金焊丝为填充材料,超音脉冲电弧的引入可以减小焊缝区粗大树枝晶的尺寸,并减少其数量,提高等轴细晶粒所占面积,且超音脉冲频率越高,晶粒细化效果越好。MIG焊接电弧热输入大、能量发散,导致在铝合金焊接中易出现气孔、各种相成分不均匀等缺陷^[5, 6]。

5356铝合金焊丝在高铁、船舶、汽车等领域作为焊接材料应用非常广泛。目前,虽然我国已有近百家焊丝生产厂,并能够自行设计制造焊丝,但国内生产的焊丝仍不能满足高性能要求,某些特殊用途的铝合金焊丝仍依赖进口^[7]。因此,开展国产化5356焊丝对6061铝合金焊接工艺研究具有现实意义。

2 试验材料及试验方法

2.1 试验材料

试验母材为厚5mm的6061铝合金板材和国内某厂生产5356焊丝,母材及焊丝成分见表1。

表1 母材及焊丝化学成分(质量分数)(%)

元素	Mg	Si	Mn	Cu	Fe	Zn	其他	Al
6061母材	1.0	0.6	0.15	0.2	0.7	0.25	0.4	余量
5356焊丝	5.2	0.13	0.1	0.01	0.13	0.12	0.17	余量

2.2 试验方法

采用国产5356铝合金焊丝进行平板对接焊工艺试验,对接焊工艺试件制备按照图1要求,焊接试板尺寸为300mm×150mm×5mm,坡口形式为60°形坡口。

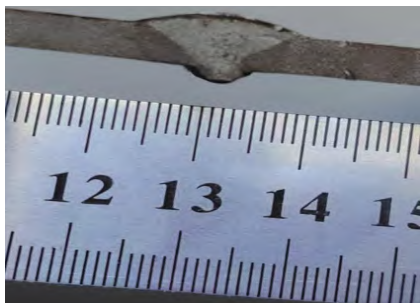


图1 焊后截面

焊前用机械方法去除试件坡口表面的氧化物及杂质,采用惰性气体保护焊(MIG)方法,焊接工艺为:焊接电流120~140A,电弧电压20~22V,焊接速度144~180mm/min,热输入2.880~4.620kJ/cm,气体流量20L/min。焊后使用渗透探伤仪和着色显像剂进行了渗透检测,未发现表面缺陷。

共焊接3个试件,将3个试件分别进行如下处理:不进行热处理、固溶处理、固溶+时效处理,试件编号分别为1#、2#、3#。具体处理方法为,固溶处理:将试件放入电阻炉中加热到520℃,保温30min后进行水淬。时效处理:将试件放入电阻炉中加热到180℃,保温12h后放在室温下冷却。采用HVT-1000型显微硬度计测试焊接接头的硬度,采用CMT5105微机控制万能电子试验机进行焊接接头强度测试,利用扫描电镜分析接头处合金元素的变化。

3 试验结果分析

3.1 硬度测试

焊接接头热处理前后的硬度如图2所示。由图2可知,不进行热处理的1#试件焊缝硬度呈现小幅度波动,在热影响区为先减小后增大,在距焊缝中心线6mm处热影响区其硬度降到最低值,为64HV,然后再增大,之后略有减小,且低于母材,在过渡到母材后,硬度有大幅提升,说明6061母材强度受焊接热循环影响后,热影响区的硬度有较大幅度的下降,形成明显的软化区。这是因为软化区的温度在时效温度和固溶温度之间,使Mg₂Si析出相长大并粗化,削弱了沉淀强化和固溶强化的作用^[3],在热影响区与母材交界处,硬度略低,主要是对母材产生了退火作用。

焊后固溶处理的2#试件在焊缝区、热影响区的硬度均有明显提升,且显著高于1#试件。从焊缝区、热影响区、母材综合来看,整体硬度曲线呈上升趋势,由于5356铝合金焊丝中Mg含量高于母材6061铝合金,因此在520℃保温30min会使Mg元素向热影响区扩散,在热影响区析出Mg₂Si相,在水淬过程中部分Mg₂Si相固溶于基体中,在固溶过程中析出Mg₂Si相成为强化相,使焊接接头热影响区的硬度有所提升。

3#试件在焊后进行了固溶+时效处理,硬度逐

渐增大，并且高于1[#]、2[#]试件。热影响区的硬度得到大幅提升，达到110HV以上，已经接近热影响区外的母材硬度。焊接接头通过固溶处理后，溶质元素可充分固溶进基体内部，并在有限的区域内进行扩散；再进行人工时效处理后，溶质元素通过溶质再分配过程，在晶粒和晶界处析出细小的Mg₂Si强化相，使焊接接头硬度有了明显提高；但受热循环和热处理的影响，材料的晶粒组织会逐渐吞噬和长大，导致晶界体积比下降，因此，经过固溶+时效处理后，焊接接头热影响区硬度虽有所提高，但还略低于热影响区外的母材。

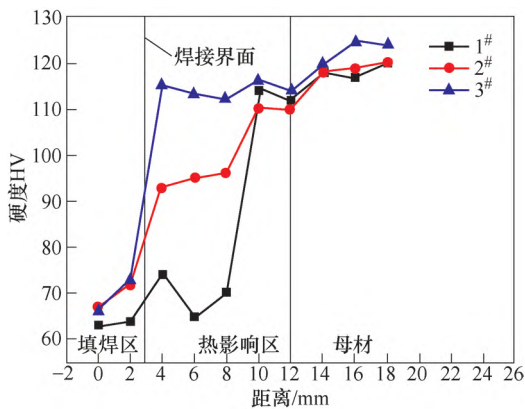


图2 不同焊接接头硬度分布

3.2 强度测试

对1[#]、2[#]、3[#]试件分别制取拉伸试样，然后进行力学性能试验，并对试验结果取平均值，见表2。

表2 焊后热处理焊接接头的力学性能

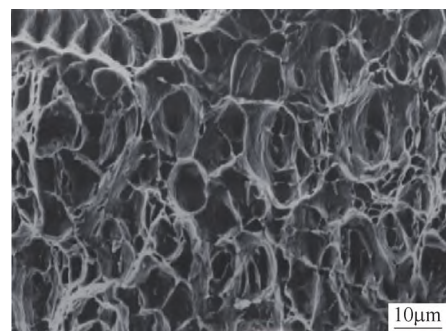
试样编号	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A (%)
1 [#]	208.07	16.2
2 [#]	241.95	11.6
3 [#]	246.77	12.1

1[#]试件抗拉强度为208.07MPa，断后伸长率为16.2%。2[#]试件进行固溶处理后，抗拉强度提高到241.95MPa，断后伸长率下降到11.6%。3[#]试件进行固溶+时效处理后，其抗拉强度提高至246.77MPa，断后伸长率下降至12.1%。焊后固溶处理和焊后固溶+时效处理都能有效提升焊接接头强度，其中固溶+时效处理对焊接接头强度提升最大。

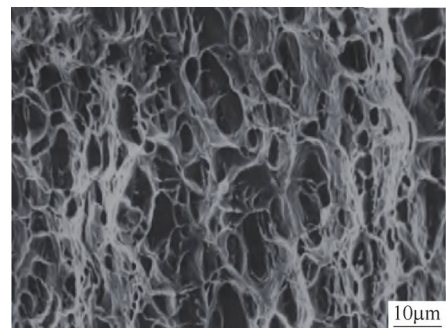
分析上述结果认为，焊后固溶+时效处理焊接接头抗拉强度最大，伸长率居中，其原因为经过

固溶处理后，Mg与Si固溶进基体 α (Al) 相中，获得过饱和固溶体；在进行时效处理过程中，基体 α (Al) 相中的Mg和Si原子逐渐聚集在晶体表面，形成溶质原子富集区 (G.P.区)，析出相迅速长大，变成针状或棒状 (β' 相)，随着温度的升高或者时间的延长， β' 相转变为不稳定的 β' 过渡相，然后在晶体界面上， β' 相逐渐消耗，最终形成稳定的 β 相，即Mg₂Si强化相，并对材料性能起到强化作用，即焊接热循环对接头强度影响较弱，这与硬度测试结果一致。

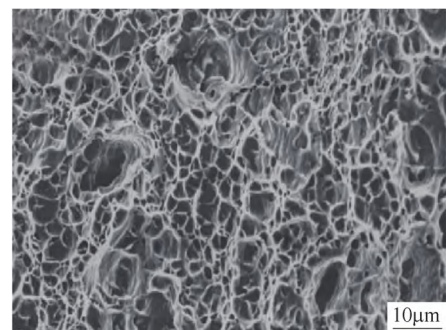
图3所示为试验断裂后的断口形貌。1[#]试件中大量深的韧窝表明该处在最大拉应力作用下，以韧窝断裂方式为主，为韧性断裂。2[#]试件中韧窝与1[#]试件相似，同时伴随“蛇形滑移”特征，表明该处是韧性断裂为主的剪切断裂。3[#]试件为韧窝断裂和解



a) 1[#]试件



b) 2[#]试件



c) 3[#]试件

图3 拉伸断口SEM形貌

理断裂的混合断裂方式，部分韧窝大而深，6061铝合金中含有 Mg_2Si 相与Al基体，两者具有不同的弹性模量。在变形过程中， Mg_2Si 周围变形的不协调使得 Mg_2Si 相与基体发生脱黏或者 Mg_2Si 相本身发生破裂，导致初始微孔洞的形成^[8]。断口特征与强度、伸长率吻合。

3.3 界面成分测试

图4所示为不同焊接接头焊接界面周围的溶质成分分布，图中左侧为母材区，右侧为填焊区。从图4a可以明显看出，Mg元素在界面两侧有着明显成分梯度，右侧填焊区的Mg元素含量显著高于母材区，这符合填焊区5356焊丝材料与母材区6061材料的Mg元素含量差异；Si元素两侧差异不明显，填焊区的Si元素含量略低于母材区。从图4b可看出，经过固溶处理后，两区Mg元素含量梯度减小，说明在固溶处理的过程中，Mg元素穿过焊接界面发生了扩散行为，由高浓度组织向低浓度组织扩散；Si元素含量变化不明显。从图4c可看出，经过固溶+时效处理后，两侧区域的Mg元素和Si元素含量已经趋于一致，这是因为在固溶过程中，溶质元素固溶进基体中，促进了溶质的扩散和再分配过程，最终经固溶+时效处理后析出 Mg_2Si 相。

4 结束语

1) 采用5356焊丝焊接的6061铝合金经固溶处理、固溶+时效处理后，焊接接头热影响区硬度提高，固溶+时效处理后热影响区硬度达110HV。

2) 固溶+时效处理后焊接接头强度增加18.6%、伸长率下降25%。

3) 1#、2#试件断口以韧窝断裂为主，3#试件断口为韧窝断裂和解理断裂的混合断裂方式，部分韧窝大而深，主要原因为6061铝合金中含有 Mg_2Si 相且与Al基体弹性模量不一致。

参考文献：

- [1] 卫晏华，尹志民. 铁路列车车辆用大型铝合金型材焊丝的选用与生产[J]. 有色金属加工，2005（4）：21-24.
- [2] 焦好军，胡明臣，周炼刚，等. 新一代运载火箭2219铝合金配用焊丝研制[J]. 宇航材料工艺，2007（6）：61-64.
- [3] 任泽良，项肇，余细平，等. 6061铝合金MIG焊接

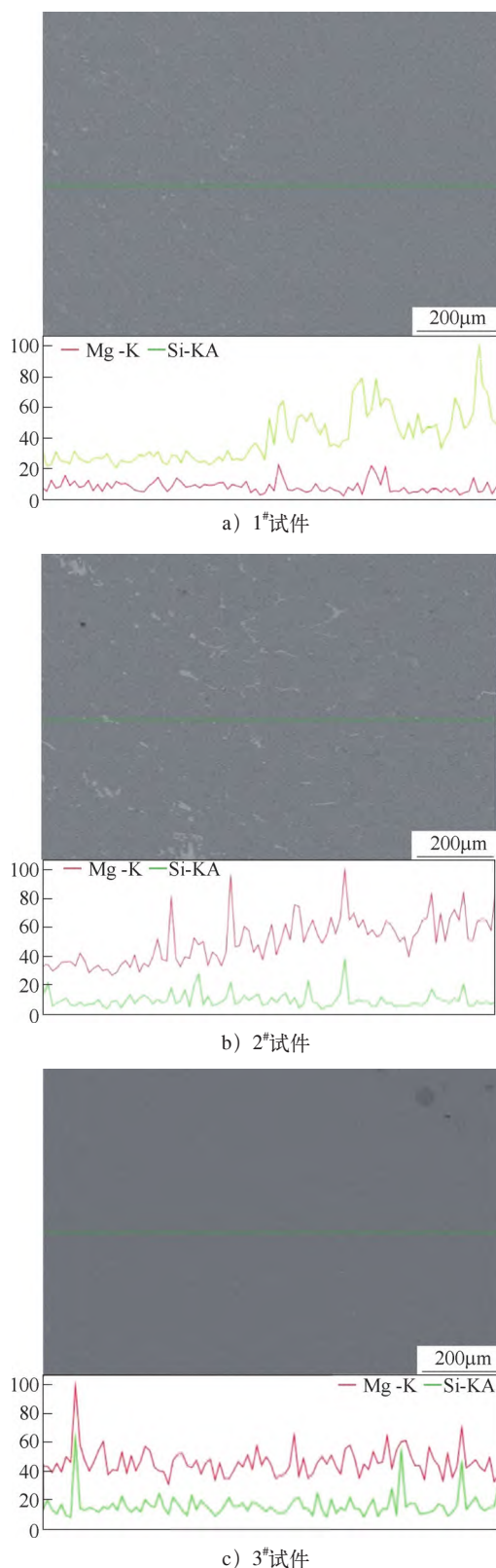


图4 不同焊接接头熔合区域成分分布

头的组织和力学性能研究[J]. 热加工工艺，2023，52（3）：139-141，148.

- [4] 周新志，马明月，龚川江，等. 焊接电流对6061铝

（下转第65页）

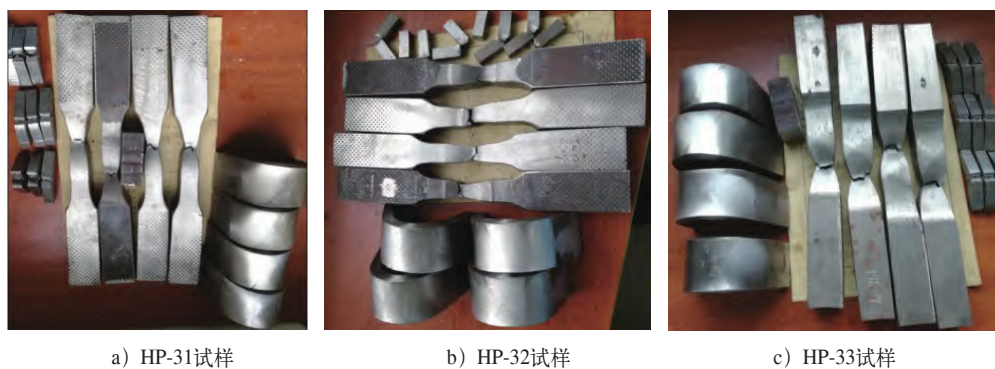


图5 焊接工艺评定试样

标准为：3个试样的冲击吸收能量平均值 $\geq 60\text{J}$ ，单个值 $\geq 42\text{J}$ 。3组评定试验中，焊缝区冲击吸收能量平均值最小为 83.3J （HP-33），试验结果均满足设计和标准要求。

（3）焊接接头硬度检测数据分析 在不同的热处理时间条件下，焊接接头的硬度基本维持在 220HBW 左右；随着热处理时间的增加，各区域硬度均有下降趋势^[5]。

4.2 结论

07MnNiMoDR钢、10Ni3MoVD钢之间采用埋弧焊接，按给定的焊接及热处理参数进行施焊和热处理，焊接接头的抗拉强度高于母材抗拉强度下限值，焊缝区、热影响区的冲击韧度、焊缝的塑性良好，满足标准和设计要求。

5 结束语

为满足生产实际需要，对07MnNiMoDR钢和10Ni3MoVD钢两种材质组合进行埋弧焊，并进行焊接工艺评定。在进行焊接工艺评定过程中，分别对焊接试板进行了不同的热处理保温时间操作，通过

取样进行拉伸试验、弯曲试验、低温冲击试验等力学性能试验并记录了相关的试验数据，其力学性能试验结果均符合标准规范的要求，所进行的3组焊接工艺评定试验结果合格。埋弧焊焊接方法在球罐产品上的应用，显著提高了产品的制造效率，同时提高了焊接质量。

参考文献：

- [1] 刘峰，庞玉华，罗远，等. 基于07MnNiMoDR钢热处理工艺窗口的热处理工艺[J]. 金属热处理，2021，46（10）：137-143.
- [2] 卢俊文，湛立宁，丁玉松，等. 低温压力容器用钢07MnNiMoDR焊接工艺研究[J]. 化工设备与管道，2022，59（5）：17-22.
- [3] 袁榕，姚佐权，陈学东. 球形储罐的建造技术及其发展趋势[J]. 压力容器，1997（1）：49-60，90.
- [4] 朱彩萍. 丙烯球罐用07MnNiMoDR钢的焊接研究[J]. 特种设备安全技术，2015（1）：57，47.
- [5] 董浩. 07MnNiMoDR钢模拟焊后热处理工艺、组织及性能研究[D]. 重庆：重庆大学，2022.

（收稿日期：20250107）

（上接第59页）

- 合金焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 焊接技术，2024，53（8）：18-23，145-146.
- [5] 康金文，梁宝山，武永利，等. 6061铝合金超音频脉冲MIG焊接头微观组织及力学性能[J]. 焊接技术，2024，53（12）：41-46，146.
- [6] 刘斌. 6061铝合金材料焊接特性及焊接工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2010（8）：67-69.

- [7] 黄敏，刘铭，张坤，等. 铝及铝合金焊丝的研究与发展现状[J]. 有色金属加工，2008（2）：9-12.
- [8] 李汉林，何涛，霍元明，等. AA6063铝合金韧性断裂断口分析[J]. 上海工程技术大学学报，2021，35（3）：197-200，228.

（收稿日期：20250414）