

龙敏浩,潘柏清,剡苏荣,等.补焊对6005A-5083铝合金焊接接头组织与性能的影响[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(2):117-124. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.02.017

LONG M H, PAN B Q, YAN S R, et al. Influence of Repair Welding over Microstructure and Mechanical Properties of a 6005A-5083 Aluminum Alloy Welded Joint[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(2): 117-124. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.02.017

补焊对6005A-5083铝合金焊接接头组织与性能的影响

龙敏浩¹,潘柏清¹,剡苏荣¹,丁浩¹,刘雄¹,王向东¹,王维裔^{2*},叶绩²

(1.株洲中车时代电气股份有限公司制造中心,湖南株洲412001;2.中南大学材料科学与工程学院,湖南长沙410083)

摘要:为验证补焊工艺对6005A-5083焊接接头的力学及耐蚀性能的影响,通过金相显微镜、扫描电镜、硬度计、慢应变速率拉伸试验机等仪器对焊接接头的微观组织及性能进行测试分析.结果表明:补焊前后,焊接接头的组织、硬度分布规律没有明显变化;焊缝区、5083基材侧热影响区、6005A侧热影响区的宽度分别为10, 10, 35 mm左右,且显微硬度上存在明显的软化区;补焊前后,焊接接头的抗拉强度、屈服强度及伸长率分别为181 MPa, 115 MPa, 7.2%及183 MPa, 116 MPa, 8.9%;经补焊后,接头的晶间腐蚀敏感性略有增加;补焊前后,焊接接头均未表现出明显的应力腐蚀敏感性.

关键词:6005A-5083焊接接头;补焊;耐蚀性能;力学性能

中图分类号: TG444.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2022)02-0117-08

Influence of Repair Welding over Microstructure and Mechanical Properties of a 6005A-5083 Aluminum Alloy Welded Joint

LONG Minhao¹, PAN Baiqing¹, YAN Surong¹, DING Hao¹,

LIU Xiong¹, WANG Xiangdong¹, WANG Weiyi², YE Ji²

(1. Manufacturing Center, CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To verify the effect of repair welding process on the mechanical and corrosion resistance of 6005A-5083 welded joint, the microstructure and properties of welded joint are analyzed by means of metallographic microscopy, scanning electron microscopy, hardness test and slow strain rate tensile test. The change in microstructure and hardness distribution of the welded joints is no obvious variation after repair welding. The widths of weld zone, the heat-affected zone (HAZ) adjacent to 5083 base metal, and the HAZ adjacent to 6005A base metal are about 10, 10 and 35 mm, respectively. Besides, microhardness softening zone is obviously observed on both welded joints. Before and after repair welding, the tensile strength, yield strength and elongation of welded joints are 181 MPa, 115 MPa, 7.2% and 183 MPa, 116 MPa, 8.9% respectively. After repair welding, the intergranular corrosion sensitivity of the joint increases slightly. The joints present no obvious

收稿日期: 2021-02-02

基金项目: 中车株洲电力机车研究所有限公司研究项目资助(K10TZ20P0500)

*通信作者, E-mail: wangweiyi19940402@csu.edu.cn

stress corrosion sensitivity before and after repair welding.

Keywords: 6005A-5083 welded joints; repair welding process; corrosion behavior; mechanical properties

轻量化作为节能减排、发展低碳经济的重要途径,已在铁路行业中得到共识.作为轻量化的重要技术路径之一,轻质、强度高的新材料越来越得到重视^[1].5083 铝合金是一种非热处理强化的 Al-Mg 合金,强度较高,具有良好的成形性、耐蚀性及焊接性能,目前已广泛使用在轨道车体和电气屏柜中.6005A 铝合金挤压型材同样在轨道车体和下挂屏柜中大量使用^[2-3].对于高速列车下挂电气屏柜,柜体通过吊耳与车体下的横梁连接,而吊耳是由 6005A 铝合金型材和 5083 铝合金板材焊接而成^[4].

在 5083 与 6005A 铝合金的焊接过程中,由于母材成分、受热程度不同,导致焊后接头不同部位的组织与性能也不同.火巧英等^[5]研究了激光-MIG 复合焊 6005A-5083 铝合金焊接接头的组织与力学性能,发现 6005A 铝合金侧热影响区为整个焊接接头硬度最低的部分,且宽度远大于 5083 铝合金一侧.由于铝合金的熔点较低,导热率和热膨胀系数较大,在焊接过程中易产生气孔等缺陷,此外,焊接接头服役也有可能带来损伤.为了弥补外部力学或环境损伤对接头带来的不利影响,通常会采用补焊工艺对其进行修复^[6].

6005A-5083 铝合金在焊接及补焊后可能会存在热裂纹、气孔等缺陷,而焊接变形和内应力也可能影响接头的腐蚀性能,同时,裸露的焊缝周围会与空气中的 Cl^- 以及酸性腐蚀介质 SO_4^{2-} 等优先发生腐蚀,引起焊接接头的性能下降^[7].因此,为了确定焊接及补焊对焊接接头性能的影响,对补焊前后 6005A-5083 焊接接头的力学及耐蚀性进行全面分析,评估其质量,为后续的工艺改进、失效评估和寿命预测提供实验数据基础.

本文基于 6005A-5083 铝合金焊接接头,通过金相显微镜、扫描电子显微镜等设备,分析焊接接头处不同部位的微观组织变化特征规律,并通过晶间腐蚀及应力腐蚀试验,评估焊接接头不同特征区域抗腐蚀性能的差异性,从而为 6005A-5083 铝合金的异种金属焊接与补焊提供理论依据与实验基础.

1 实验材料与方法

1.1 实验材料与工艺

一次焊接的焊接材料为 6005A 与 5083 铝合金,填充材料为 ER5356 铝合金焊丝.补焊接头为在一次焊接的基础上,将 6005A 铝合金侧焊接接头通过机械加工去除,再通过熔化极气体保护焊制备,填充材料同样为 ER5356 铝合金焊丝,一次焊接及二次焊接试样都通过了渗透探伤和射线探伤检测.其中 6005A 铝合金的化学成分为 Al-0.71Mg-0.50Si-0.26Mn-0.16Cr-0.19Fe(质量分数),5083 铝合金的化学成分为 Al-4.98Mg-0.75Mn-0.09Cr-0.09Si-0.20Fe(质量分数),ER5356 铝合金焊丝的化学成分为 Al-4.90Mg-0.12Si-0.12Fe(质量分数).

1.2 实验方法

1.2.1 金相组织观察

金相组织观察以 6005A-5083 铝合金焊接接头的焊缝为中心,垂直于焊缝取样,金相样品达到抛光态后,使用 Keller 试剂(1%HF+1.5%HCl+3%HNO₃)腐蚀表面,通过 Leica DM-4000M 金相显微镜观察形貌.

1.2.2 维氏硬度测试

参照 GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》,以一次焊接及二次焊接接头的焊缝中心为原点,其标线与测点位置如图 1 所示.测试仪器为宝菱 HXD-2000TMSC 数显显微硬度计,测试间隔为 2 mm,每个点测试 5~8 次,然后对其硬度取平均值,硬度加载载荷为 1 kg,加载时间为 10 s.

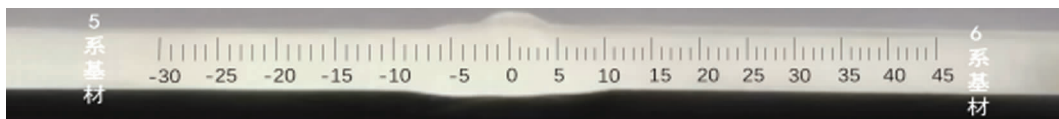


图1 焊接接头硬度标线与测点位置(单位:mm)

1.2.3 室温拉伸性能测试

室温拉伸试样以焊缝为中线,分别向焊缝两侧通过线切割取样,之后使用砂纸打磨至没有切割痕迹,其尺寸如图2所示.室温拉伸实验在MTS 810 万能材料试验机进行,拉伸速率为2 mm/min,一次焊接及二次焊接接头均测试3个平行样,通过引伸计测试其伸长率,试样的断口采用扫描电镜进行观察分析.

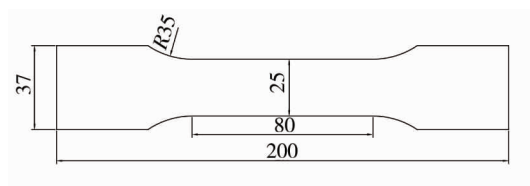


图2 焊接接头拉伸试样(单位:mm)

1.2.4 晶间腐蚀

参照GB/T 7998—2005 进行晶间腐蚀实验,实验对象为补焊前后的焊接接头.试样经粗磨、细磨、机械抛光后,用无水乙醇和蒸馏水清洗、干燥,随后置于腐蚀溶液中浸泡.待浸泡至规定时间后,将试样迅速从腐蚀介质中取出,再次用蒸馏水清洗、干燥.将试样沿焊接接头横截面一端5 mm处切下,磨制和抛光处理后,借助金相显微镜观察试样的腐蚀程度,并测量其腐蚀最大深度与平均深度,进行晶间腐蚀等级评定.

1.2.5 应力腐蚀

依据GB/T 15970.7—2000 进行应力腐蚀测试,实验对象为补焊前后的焊接接头,以6005A-5083 铝合金焊接接头焊缝为中心,垂直于焊缝向两侧取样.试样尺寸参考GB/T 15970.7—2000 选取,如图3所示.采用慢应变速率拉伸实验,分别测试室温条件下接头在干燥空气与3.5%NaCl 溶液中的应力腐蚀敏感性.实验设备型号为长春机械院MFDL20.

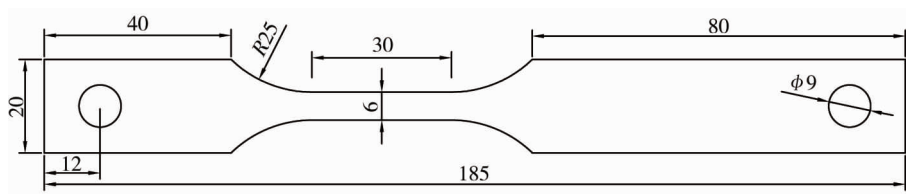


图3 焊接接头应力腐蚀试样(单位:mm)

2 实验结果与讨论

2.1 金相组织

图4为6005A-5083 铝合金焊接接头的金相形貌,其中,图4a、图4b分别为补焊前后的接头形貌.图4中的(1)~(5)分别为6005A 铝合金母材、6005A 铝合金侧热影响区、焊缝区、5083 铝合金侧热影响区、5083 铝合金母材.由图4可以看出:补焊前后的焊接接头中,6005A, 5083 铝合金母材中的晶粒都为纤维状,焊缝区为明显等轴晶.补焊前后存在较大差异的是焊缝区域,在二次焊接后,焊缝区分成了上下2层,有1条明显的圆弧形边界,边界上下区域的组织也存在显著不同.在圆弧形边界上方的焊缝区,组织从上到下由树枝晶逐渐转变为细小等轴晶,越靠近圆弧形边界,晶粒越粗大.6005A, 5083 铝合金母材呈现出纤维状的变形组织,均匀整齐地沿着水平方向分布,这是由于6005A, 5083 铝合金分别为挤压型材和轧制板材,在热挤压或轧制过程中,铸态的等轴晶粒会发生变形.6005A 铝合金侧热影响区所发现的枝晶组织是焊接过程中的非平衡凝固所致,而5083 铝合金侧热影响区是由等轴晶、柱状晶组成.补焊前后,焊缝区域中的组织存在一定的差异,但各区域的组织形貌呈现的趋势基本相同.

2.2 维氏硬度

图5为补焊前后6005A-5083 铝合金焊接接头的硬度分布曲线,其中图5a为一次焊接接头的硬度,图5b为二次焊接接头的硬度.由图5可以看出:5083,6005A 铝合金基材部分的硬度分别为85, 100 HV左右.无论是一次焊接试样还是二次焊接试样,焊缝区的宽度均为10 mm左右.受合金热导率的影响,从焊缝中心到5083 铝合金基材位置的长度较短,约为10 mm左右(5083 铝合金侧热影响区较小);而焊缝中心到6005A 铝合金基材位置的长度较长,约为35 mm左右(6005A 铝合金侧热影响区较长).此外,从图5中还可以看出:焊接后,焊缝及其热影响区位置的硬度会低于母材.二次焊接后,5083 铝合金侧试样表面硬度

的变化不大,焊缝区接近 6005A 铝合金侧的硬度显著下降,形成了焊缝硬度值的最低区域,该部分发生软化的原因可能与该区域 Mg 元素的含量较低有关,导致强化相 Mg_2Si 粒子的数量明显减少,因此,硬度下降^[8-9].

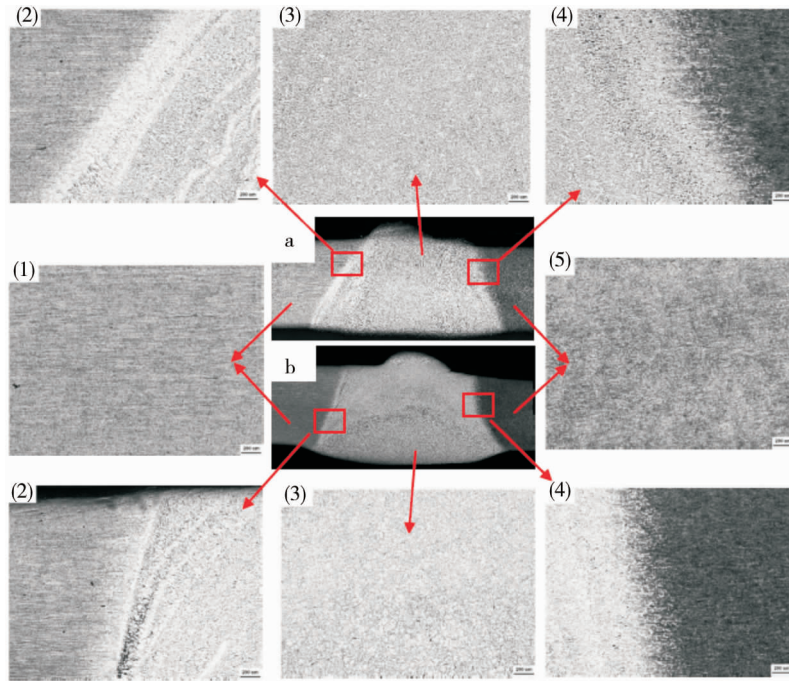


图4 补焊前后 6005A-5083 焊接接头金相组织

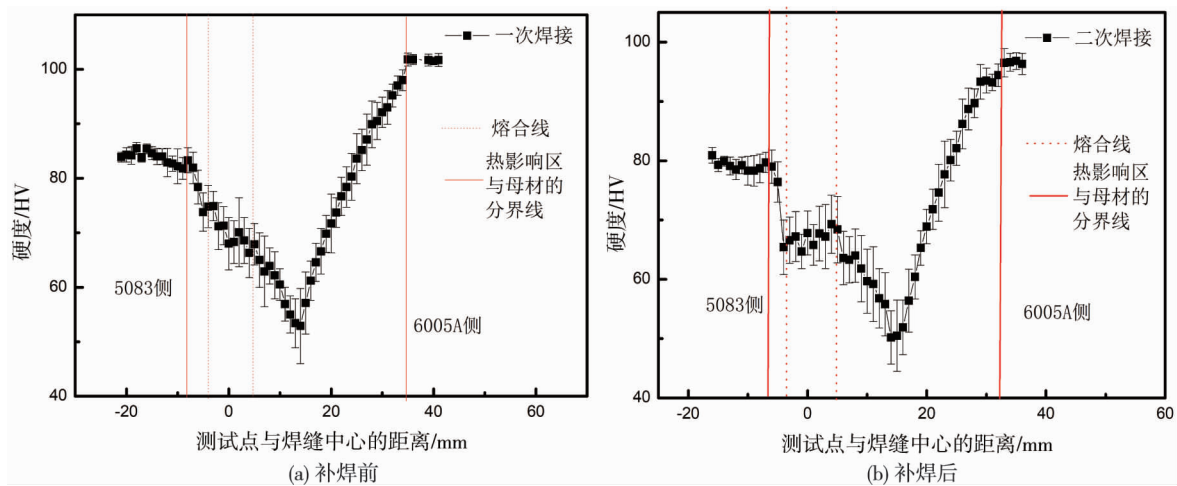


图5 补焊前后焊接接头的硬度分布

2.3 室温拉伸

6005A-5083 铝合金焊接接头在补焊前后的室温拉伸性能结果如表 1 所示.由表 1 可以看出:6005A, 5083 铝合金经一次焊接后,其抗拉强度为 181 MPa,屈服强度为 115 MPa;经二次焊接后,焊接接头的抗拉强度、屈服强度及伸长率都有所提高.断裂位置都在焊接接头 6005A 铝合金侧的热影响区,由于软化区的存在,该位置成为力学的薄弱环节.在较大外力的作用下,优先引起不可逆的塑性形变,最终发生断裂.

表1 一次焊接与二次焊接试样接头的室温拉伸结果

试样	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	断裂位置
一次焊接	115.4±2.3	181.1±5.1	7.2±2.8	6系热影响区
二次焊接	116.0±5.6	183.3±2.7	8.9±0.4	6系热影响区

图6为6005A-5083铝合金焊接接头的拉伸断口形貌及EDS能谱.由图6可以看出:一次焊接接头断口表面凹凸不平、起伏较大,在试样表面能观察到大量韧窝,为韧性穿晶断裂特征;与一次焊接试样相比,二次焊接试样的宏观特征变化不大,都能在表面观察到大量韧窝.由于样品的韧性较好,断裂时发生撕裂的痕迹.通过比较可以看出:补焊后接头的韧窝更大、更深,表明其韧性相比一次焊接有所提高.断口韧窝内存在2种主要的第二粒子:块状的 $\text{AlFe}(\text{Mn})\text{Si}$ 相粒子及球状的Cu含量较高(Cu的质量分数为48%)的 Al_2Cu 颗粒^[10].

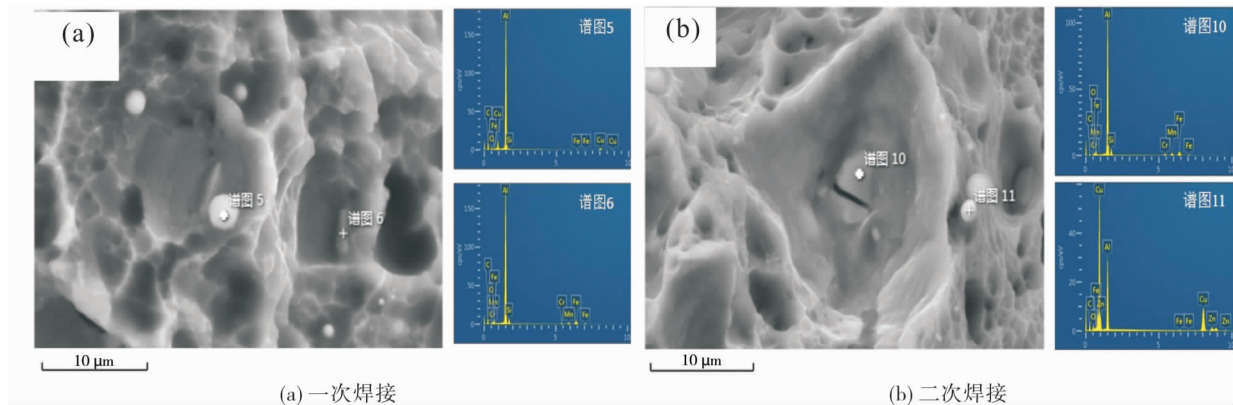


图6 断口形貌及韧窝内粒子能谱

2.4 晶间腐蚀

补焊前后的6005A-5083铝合金焊接接头在晶间腐蚀溶液中浸泡24 h后,沿纵切面剖开观察合金内部的腐蚀情况,通过金相显微镜测量软件对腐蚀深度进行统计分析.图7为一次焊接后6005A-5083铝合金焊接接头各区域的晶间腐蚀结果.由图7可以看出:焊缝区与5083铝合金侧热影响区的晶间腐蚀较为明显,其中焊缝的最大腐蚀深度为 $87\ \mu\text{m}$,5083铝合金侧热影响区的最大腐蚀深度为 $47\ \mu\text{m}$.一次焊接试样的晶间腐蚀深度评定结果如表2所示.由表2可以看出:试样焊缝区的腐蚀敏感性最高,平均晶间腐蚀深度为 $11.52\ \mu\text{m}$;6005A铝合金侧热影响区的抗晶间腐蚀性能最佳,其平均腐蚀深度仅为 $5.77\ \mu\text{m}$;对于一次焊接后的6005A-5083铝合金焊接接头来说,其晶间腐蚀敏感性的排序:焊缝区>6005A铝合金基材>5083铝合金侧热影响区>5083铝合金基材>6005A铝合金侧热影响区.

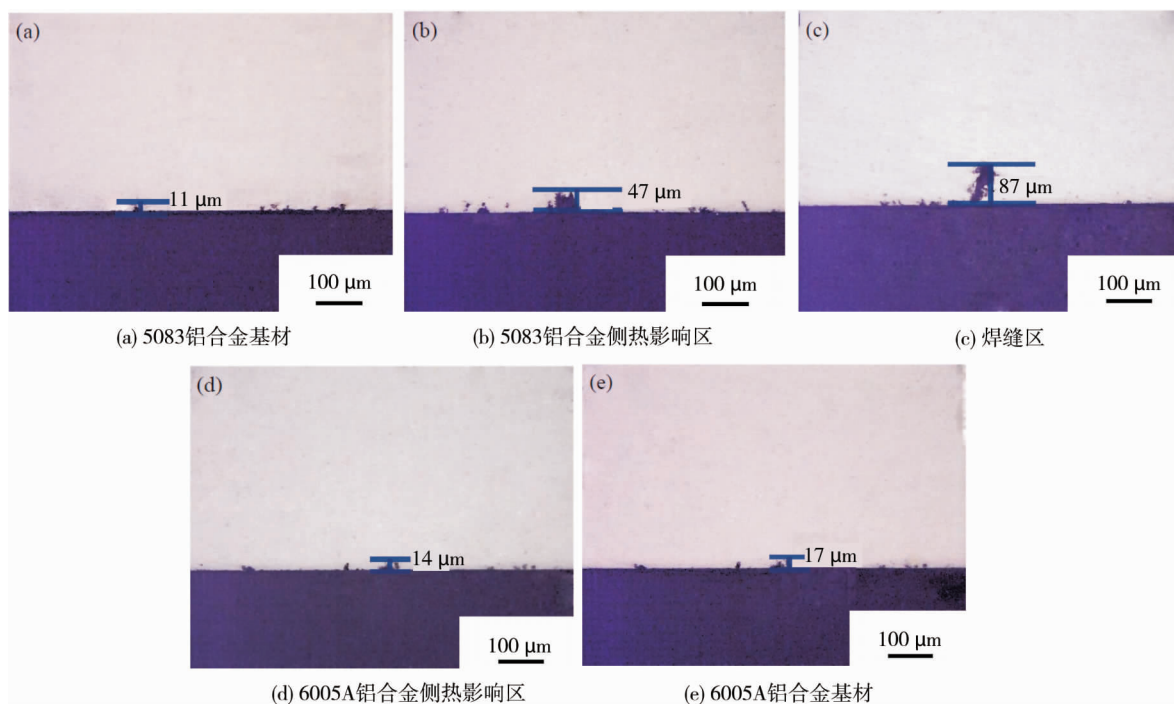


图7 一次焊接后焊接接头的晶间腐蚀组织形貌

表2 一次焊接后焊接接头各区域的晶间腐蚀深度评定

位置	5083 铝合金基材	5083 铝合金侧热影响区	焊缝区	6005A 铝合金侧热影响区	6005A 铝合金基材
平均值/ μm	7.43	9.14	11.52	5.77	9.80
最大值/ μm	11	47	87	14	17

补焊后 6005A-5083 铝合金焊接接头的晶间腐蚀组织形貌与晶间腐蚀深度评定结果分别如图 8 与表 3 所示.除两侧基材区在正常范围内波动外,补焊后接头各区域的平均晶间腐蚀深度与最大腐蚀深度均有所增加,说明经过补焊后,焊接接头对晶间腐蚀溶液的敏感性更高,这主要是由于补焊后,接头内部的晶粒变得相对粗大,晶界析出相更连续,腐蚀介质能更轻易地渗透到试样内部.5083 铝合金侧热影响区的腐蚀程度加剧,主要是受焊接温度的影响,5083 铝合金侧热影响区进一步析出 β 相,其抗晶间腐蚀性能变差.由图 8c 可以看出:经补焊后,焊缝区的最大腐蚀深度由 $87 \mu\text{m}$ 增加到 $145 \mu\text{m}$,试样表面的腐蚀弱区一旦形成,就会垂直于其表面形成腐蚀通道向基体内部腐蚀.6005A 铝合金侧热影响区、焊缝区与 5083 铝合金侧热影响区的平均腐蚀深度分别增大约 71.23%, 18.40% 与 31.84%,说明 6005A 铝合金侧热影响区在补焊过程中更易受温度的影响发生组织与性能上的变化.与一次焊接试样的不同,补焊后的 6005A-5083 铝合金焊接接头,其晶间腐蚀敏感性的排序:焊缝区>5083 铝合金侧热影响区>6005A 铝合金侧热影响区>6005A 铝合金基材>5083 铝合金基材.

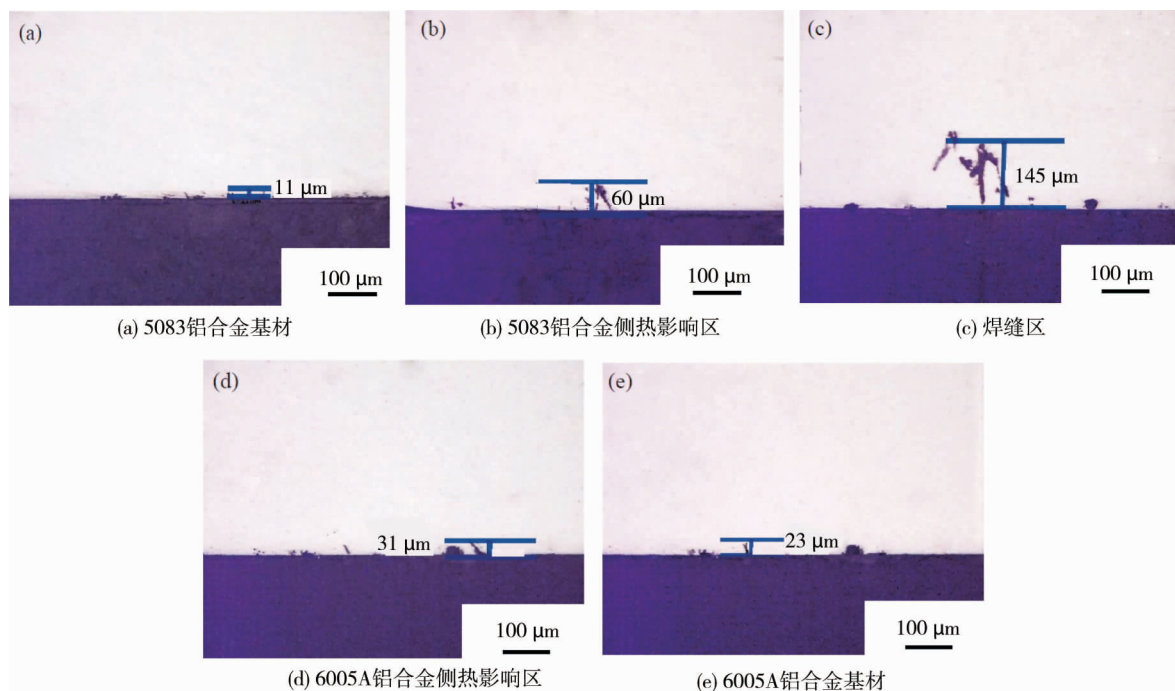


图8 补焊后焊接接头的晶间腐蚀组织形貌

表3 补焊后焊接接头各区域的晶间腐蚀深度评定

位置	5083 铝合金基材	5083 铝合金侧热影响区	焊缝区	6005A 铝合金侧热影响区	6005A 铝合金基材
平均值/ μm	7.79	12.05	13.64	9.88	9.29
最大值/ μm	11	60	145	31	23

综合对比补焊前后 6005A-5083 铝合金焊接接头的晶间腐蚀结果发现:两侧基材区由于距离热源较远,2 种试样的晶间腐蚀变化不大,6005A 铝合金基材的抗晶间腐蚀性能均低于 5083 铝合金基材.距离热源较近的两侧热影响区与焊缝区,补焊前后 6005A-5083 铝合金焊接接头均展现了相同的晶间腐蚀敏感性排序,即焊缝区>5083 铝合金侧热影响区>6005A 热影响区,这主要是与焊缝区的晶粒相对粗大,而 6005A 铝合金侧热影响区晶粒组织相对细小有关.5083 铝合金侧热影响区抗晶间腐蚀性能较差的原因主要是与其在焊接过程中受温度的影响,析出较多 β 相(Al_3Mg_2)有关^[11]. β 相在试样内部析出时,遇腐蚀介

质会优先发生反应,形成点蚀.当 β 相沿晶间大量析出时,会严重影响合金的抗腐蚀性能,特别是抗晶间腐蚀性能^[12-15].

2.5 应力腐蚀

图9为补焊前后6005A-5083铝合金焊接接头的慢应变速率拉伸曲线.由图9可以看出:补焊前后6005A-5083铝合金焊接接头在3.5%NaCl溶液中的抗拉强度均与在空气中相当,表明补焊前后的焊接接头几乎没有明显的应力腐蚀敏感性.补焊后焊接接头在空气中的伸长率略高于3.5%NaCl中的伸长率,但两者差异性也很小.补焊前后6005A-5083铝合金焊接接头的慢应变速率拉伸结果与断裂情况如表4所示.由表4可以看出:所有应力腐蚀测试试样均在6005A铝合金热影响区(距离焊缝中心约15mm位置)断裂,这与拉伸断裂位置一致.结合硬度分布曲线,发现距焊缝中心约15mm处的6005A铝合金热影响区硬度最低.

表4 接头慢应变速率测试结果

批次	腐蚀环境	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	断裂位置
一次焊接	3.5%NaCl	95.8	175.3	14.73	6005A 铝合金侧热影响区
	空气	96.7	182.3	15.69	6005A 铝合金侧热影响区
二次焊接	3.5%NaCl	92.1	168.3	14.95	6005A 铝合金侧热影响区
	空气	103.8	178.6	14.73	6005A 铝合金侧热影响区

将补焊前后6005A-5083铝合金焊接接头的断口进行SEM观察,其形貌如图10所示.由图10可以看出:一次焊接接头在应力腐蚀断裂时产生了微量的颈缩,其中,空气中的断口展现出典型的穿晶韧断特征,可以在其表面观察到大量小且深的韧窝,部分韧窝的边沿伴有撕裂棱,说明材料的塑性较好.对断口表面的粒子进行能谱分析,发现其为AlFe(Mn)Si相.在3.5%NaCl溶液中的试样断口表面,可以看到一些发黑的腐蚀坑及腐蚀产生的平台.局部放大可在腐蚀平台观察到部分泥状花样特征,并在其附近可见一些白色腐蚀介质附在边界,这些腐蚀产物由于导电性不佳在SEM中呈亮白色,经鉴定,腐蚀产物上含有Na与Cl元素,可能是6005A铝合金侧热影响区内的AlFeSi相外附着了部分NaCl所致.焊接接头断口的形貌特征在补焊前后的特征基本一致.在干燥空气与试验环境中的试样断口均产生一定的颈缩,表面呈穿晶韧断特征,断口表面的粒子能谱显示其主要为6005A铝合金中的AlFe(Mn)Si相.此外,在3.5%NaCl溶液中的试样断口表面同样可以看到一些发黑的腐蚀坑.

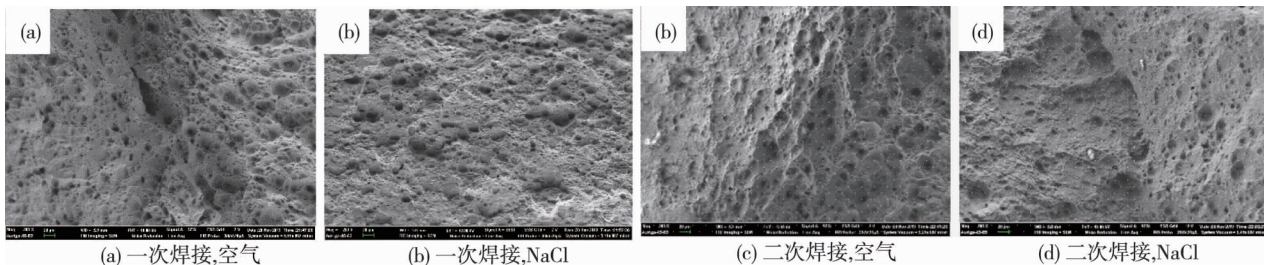


图10 慢应变速率拉伸断口

3 结论

1)一次焊接后,6005A-5083铝合金焊接接头的抗拉强度、屈服强度及伸长率分别为181 MPa, 115 MPa, 7.2%.补焊后,6005A-5083铝合金接头的抗拉强度、屈服强度及伸长率分别为183 MPa,

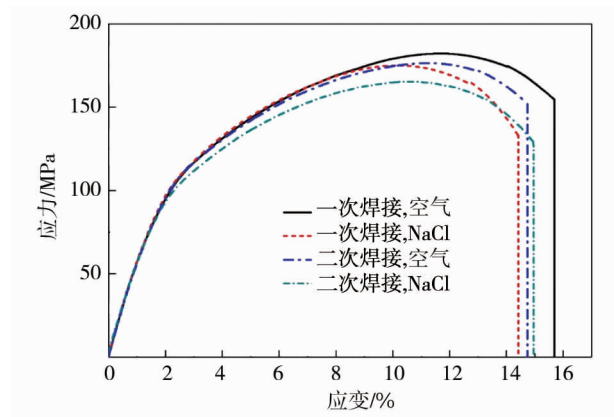


图9 SSRT 应力-应变曲线

116 MPa, 8.9%, 与一次焊接试样相比, 均略有提高。

2) 补焊前后, 焊接接头的硬度分布规律相似, 焊接接头焊缝区、5083 铝合金热影响区、6005A 铝合金热影响区的宽度分别为 10, 10 和 35 mm 左右。显微硬度上存在明显的软化区, 6005A 铝合金侧热影响区存在硬度值最低点。

3) 补焊后, 6005A-5083 铝合金焊接接头的晶间腐蚀敏感性略有增加。补焊前后 6005A-5083 铝合金焊接接头均未表现出明显的应力腐蚀敏感性。

参考文献:

- [1] 刘锡权. 轨道交通行业应用铝合金材料知识库的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 11(12): 17-20.
- [2] 刘静安. 6005A 铝合金大型特种型材的研制[J]. 轻合金加工技术, 2004(4): 36-41.
- [3] Wang X D, Liu X, Ding H, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Si alloy U-shaped profile[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(11): 2915-2926.
- [4] 潘柏清, 丁浩, 刘雄, 等. 6005A-5083 铝合金焊接接头的微观组织与力学性能研究[J]. 电焊机, 2020, 50(6): 30-38.
- [5] 火巧英, 李东风, 戴忠晨, 等. 6005A-5083 异种铝合金激光-MIG 复合焊接[J]. 电焊机, 2015, 45(3): 98-102.
- [6] 但楚臣, 丁成钢, 郭超超, 等. 6005A-T6 铝合金高频脉冲 MIG 焊补新工艺[J]. 焊接, 2018(10): 26-29.
- [7] 巩发彤, 傅成骏, 覃作祥. 6005A 铝合金焊接接头的腐蚀行为[J]. 大连交通大学学报, 2009, 30(2): 66-69.
- [8] 季卫东, 陈辉. 10 mm 厚 6005A 铝合金激光-MIG 复合焊接[J]. 电焊机, 2014, 44(9): 128-132.
- [9] 季凯, 张静. 冷热循环处理对 6005A 铝合金焊接接头显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(8): 2066-2074.
- [10] Shi L, Yang H, Guo L G, et al. Dynamic recrystallization model of 6005A aluminum alloy at elevated temperature based on microstructure analysis of hot compression[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21(2): 65-70.
- [11] 乔建毅. 轨道客车常用铝合金 5083、6082MIG 焊接工艺研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [12] Simar A, Jonckheere C, Deplus K, et al. Comparing similar and dissimilar friction stir welds of 2017-6005A aluminum alloys[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(3): 254-259.
- [13] 张铁浩, 张贺. 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织及耐应力腐蚀性能[J]. 电焊机, 2019, 49(6): 45-49.
- [14] 张鑫. 高速列车用 6 系铝合金应力腐蚀性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [15] Fernandes M F, Torres M A S, Fonseca M D P C, et al. Investigation of residual stress, stress relaxation and work hardening effects induced by shot peening on the fatigue life of AA 6005-T6 aluminum alloy[J]. Materials Research Express, 2019, 6(12): 126512-126523.