

汽车用铝合金TIG焊接工艺

万鑫铭,周佳,李阳,高丽,王光耀
(中国汽车工程研究院股份有限公司,重庆400039)

摘要:针对厚度为3 mm的6061和6101铝合金板材进行TIG焊接试验研究,分别采用四种不同的填充材料进行焊接,并分析焊接接头力学性能和显微组织。研究结果表明:所有接试验力学性能均低于母材,采用ER5356焊丝的焊接接头抗拉强度达到母材的63.2%,断后延伸率为母材的62.5%。测试焊接试样各区域的显微硬度,显示焊缝区域硬度高于其他部位。采用ER5356焊丝和ER4043焊丝的焊接接头,在焊缝区域可见晶界清晰的等轴晶粒,其热影响区的晶粒较粗大。通过对比分析显微组织和力学性能,四种填充材料中,ER5356适合作为汽车用6101和6061铝合金板材的焊接填充材料。

关键词:铝合金;惰性气体钨极保护焊(TIG);显微组织;力学性能;焊接工艺

中图分类号:TG444⁺.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2303(2014)07-0107-05

DOI:10.7512/j.issn.1001-2303.2014.07.26

Research on TIG welding process of aluminum alloy for automotive

WAN Xin-ming, ZHOU Jia, LI Yang, GAO Li, WANG Guang-yao

(China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400039, China)

Abstract: TIG welding experiments with thickness of 3mm sheets for 6061 and 6101 aluminum alloys were achieved. Four different welding wires were adopted to take as the filling material in the welding processing, and the mechanical properties and microstructures of welded joints were analyzed. The results indicated that the mechanical properties of all samples were lower than base metals', the tensile strength and elongation of welding joint which using ER5356 welding wire is 63.2% and 62.5% of the base material, respectively. The hardness test of samples presented the hardness in weld zone is higher than other parts of the region. The microstructures of welded joints which using ER4043 ER5356 welding wire showed equiaxed grains with clearly visible boundaries in the weld zone, and coarse grains in the heat affected zone. Comparing the microstructure and mechanical properties of those samples, ER5356 welding wire is suitable to take as the filler material for welding processing of 6101 and 6061 aluminum alloy sheets for automotive in those four kinds of filling material.

Key words: aluminium alloy; tungsten inert gas welding(TIG); microstructures; mechanism properties; welding process

0 前言

铝及铝合金的密度仅为钢的1/3,其抗拉强度和弹性模量比钢低,但铝合金经热处理强化后,其比强度(抗拉强度与密度之比)已超过高强度钢,接近超高强度钢(例如马氏体时效钢),其比模量(弹

性模量与密度之比)则接近于高强度钢。因此,铝合金特别适用于轻质承载结构^[1]。

当前汽车轻量化技术发展迅速,能有效降低汽车的燃油消耗量和污染物排放。世界铝业协会的报告指出:汽车自重每减少10%,燃油消耗可降低6%~8%,排放降低5%~6%。而燃油消耗量每减少1 L,CO₂排放量减少2.37 kg。因此,汽车轻量化符合我国的节能减排战略,也是构建资源节约、环境友好型社会的需要。铝合金是轻量化材料中应用比较成熟的低密度合金材料之一。铝合金材料有较好的铸造性、导热性、机加工性和耐腐蚀性。铝及铝合金的

收稿日期:2013-06-09

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAG03B06);
重庆市基础与前沿研究计划杰青项目(cstc2013-jcyj60001);重庆市科技人才培养计划(cstc2013-kjrc-qnc60003)

作者简介:万鑫铭(1978—),男,湖南株州人,博士,高级工程师,
主要从事汽车轻量化及汽车安全的研究工作。

工艺性好,易于轧压、挤压、锻压、冲压、旋压,可制成各种截面形状的铝材(如棒、板、管、丝、带)和各种形状的型材。挤压型材有利于减少焊缝数量、减小焊接变形,便于装配焊接,适于制造轻质复杂结构。

铝合金最主要的连接方法是焊接,目前铝合金焊接国内外采用的方法有钨极氩弧焊(TIG)、搅拌摩擦焊(FSW)、电子束焊(EBW)、变极性等离子弧焊(VPPAW)、熔化极气体氩弧焊(MIG)、激光焊(LSW)及多种焊接方法组合等熔焊方法^[2-5]。TIG 焊接过程稳定,保护效果好,而且经济成本低,在工业中得到广泛的应用^[6],另外 TIG 焊接研究过程相对简化,因此理论及试验研究多是针对 TIG 焊接的。

本研究从铝合金焊接工艺角度开展汽车用铝合金 TIG 焊接工艺的研究,主要针对铝合金母材、焊

丝、焊接工艺和焊接接头性能。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

试验材料选用厚度为 3 mm 的 6061 和 6101 铝合金轧制板材作为焊接母材,热处理状态为 T6,焊接用铝合金板材加工尺寸为 80 mm×46 mm×3 mm,采用 I 形坡口对接焊接,间隙为 2 mm,如图 1 所示,其主要化学成分如表 1 所示。

为分析不同焊丝材料对焊接性能的影响,焊丝材料选用 ER4043、ER5356、6061 和 6101 焊丝,焊丝直径 $\phi 2$ mm,其中 6061 和 6101 焊丝为从焊接母材上选取的焊丝材料。ER4043、ER5356 焊丝化学成分如表 2 所示。

表 1 6061 及 6101 铝合金化学成分

材料	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mg})$	$w(\text{Fe})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Zn})$	$w(\text{B})$	$w(\text{Ti})$
6061	0.40~0.80	0.80~1.20	0.70	0.15~0.40	0.04~0.35	0.15	0.25	—	0.15
6101	0.30~0.70	0.35~0.80	0.50	0.10	0.03	0.03	0.10	0.06	—

表 2 铝及铝合金标准焊丝化学成分(ANSI/AWS A5.10-1992)

焊丝型号	$w(\text{Si})$	$w(\text{Fe})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Mg})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Zn})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{其他})$	$w(\text{Al})$
ER4043	4.5~6.0	0.8	0.3	0.05	0.005	—	0.1	0.20	0.15	余量
ER5356	0.25	0.4	0.1	0.50~0.20	4.5~5.5	0.05~0.20	0.1	0.06~0.20	0.15	余量

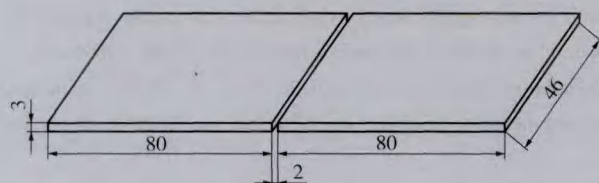


图 1 铝合金薄板几何尺寸(单位:mm)

1.2 试验方法

焊前用钢丝刷或砂纸打磨坡口及周边区域,并用碱洗除油和酸洗去除表面氧化层。采用交流电焊机,手工 TIG 焊接方式进行焊接(焊机型号 WSE 500S),钨极直径 $\phi 5.0$ mm,端部为半球形,保护气体为氩气,纯度 99.99%,喷嘴直径 13 mm,喷嘴高度 14 mm,氩气流速 10 L/min,焊接电流 180 A,焊接速度 50 cm/min,送丝速度 110 cm/min。试样焊好后放入保温箱(温度 168 $^{\circ}\text{C}$)4 h,然后随炉冷却。

在焊接工艺试验完成后,在焊接试样上分别取样,按试样标准加工处理后进行拉伸试验,并进行金相和显微硬度分析。试验设备采用万能拉伸试验

机(型号:SANS CMT5305)。

(1)将焊后的铝合金板(160 mm×46 mm×3 mm)按照如图 2 所示的尺寸加工成拉伸试样,然后进行拉伸试验测试,获得焊接接头的力学性能。

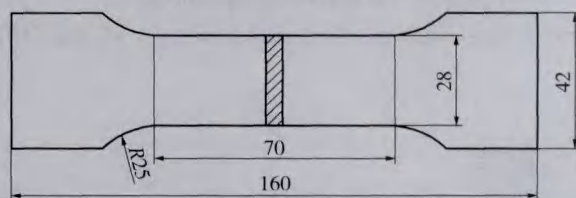


图 2 拉伸试验尺寸

(2)焊接后的试样进行显微硬度测试。

(3)对拉伸后的焊缝进行组织观察。

2 试验结果和分析

2.1 焊接接头性能

2.1.1 焊接接头的力学性能

分别选用 ER4043 焊丝、ER5356 焊丝、40 mm×2 mm 的 6061 铝合金焊丝和 6101 铝合金焊丝将厚

度为 3 mm 的 6061 铝合金薄板和 6101 铝合金薄板采用 I 形接口焊接在一起(见图 1)。

采用不同焊丝材料的焊接接头力学性能如表 3 所示。由表 3 可知,采用不同焊丝的焊接接头力学性能均低于母材,采用 ER5356 焊丝的焊接抗拉强度为母材的 63.2%,延伸率为母材的 62.5%。

表 3 母材及焊接接头拉伸力学性能

材料	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	延伸率 δ /%	断裂 位置
母材 6061	349	327	12.0	—
母材 6101	223	195	15.0	—
ER5356 焊丝	141	87	7.5	HAZ
ER4043 焊丝	107	94	7.1	WZ
6101 焊丝	105	72	4.2	WZ
6061 焊丝	62	54	3.8	WZ

由表 3 可知,除采用 ER5356 焊丝的焊接接头断裂在热影响区外,其他三种都均断裂在焊缝处,这是因为 5356 焊接接头的硬度变化幅度小,焊缝区硬度与母材区基本一致,焊接过程对接头的影响也较小,在拉伸试验中接头的断裂位置多发生在热影响区。采用焊丝 ER4043、6101 和 6061 断裂在焊缝处是因为在焊接过程中没有出现“软化子区”,接头的薄弱环节在焊缝区应力比较集中,因而在拉伸试验中多断裂在焊缝处。并且在焊接过程中均出现裂纹现象,强度太高或强度太低都容易出现裂纹。从焊接接头的抗裂纹能力来说,ER5356 焊丝性能最佳。

2.1.2 焊接接头的硬度分布

硬度是表征金属材料软硬程度的一种性能,能敏感地反映出金属材料的化学成分和组织结构的差异,本实验测试采用韦氏硬度(HV)。由于在焊接过程中热源作用的局部性和瞬时性,造成焊接接头的化学成分和组织都不均匀,因而在测试过程中出现数据波动属于正常现象。

焊接接头一般由母材区 BM(base metal)、热影响区 HAZ(heat affected zone)、熔合区 FZ(Fusion zone)和焊缝区 WZ(weld zone)组成。焊接接头各区域的硬度分布情况如图 3 所示。由图 3 可知,ER5356 焊丝焊缝硬度较低,这是由于 TIG 焊接接头整体属于低匹配接头,整个接头的硬度和母材硬度相差不大,以防止铝合金焊接时出现热裂。采用 ER4043、6101 和 6061 焊丝的焊缝硬度均较高,尤其是采用 ER4043 和 6061 焊丝焊接的硬度在 70 HV 以上,硬

度过高会降低焊接接头塑性,容易出现裂纹,并明显影响其力学性能。

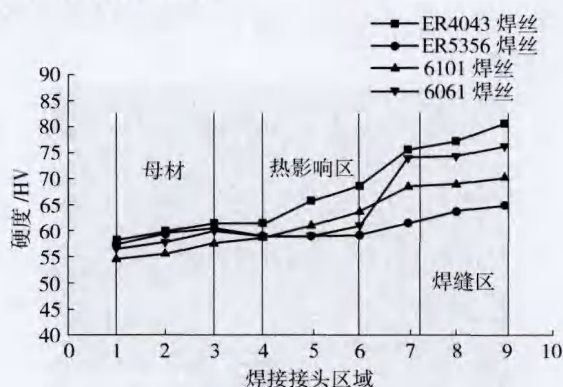


图 3 焊接接头硬度分布(靠近母材 6101 侧)

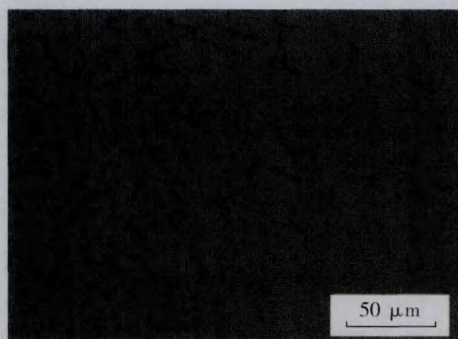
图 3 中可以看到,热影响区及其附近母材的硬度要低于焊缝区域内的硬度。这是因为焊缝中心由致密性较好的等轴晶组织组成,其韧性好、硬度高。在未焊接前母材的硬度平均值为 102 HV。焊接后,母材区域的硬度明显下降,这种现象主要由焊接后的退火消除应力热处理造成。热处理破坏合金原有的加工硬化层,致使焊接后工件的硬度普遍降低^[6]。

图 3 中四条曲线在焊缝区域时,硬度都随之增加。但是增加的幅度不同,ER4043 焊丝和 6061 焊丝增加较快,这说明焊缝的硬度较高,6101 焊丝的焊缝也高于母材,但与上两种焊丝相比,增加的幅度较小。而 ER5356 焊丝的焊缝略高于母材。通过拉伸试验和硬度试验表明,ER5356 焊丝和 6 系铝合金熔合性比较好,并且母材和热影响区的强度、塑性与焊缝较为接近。

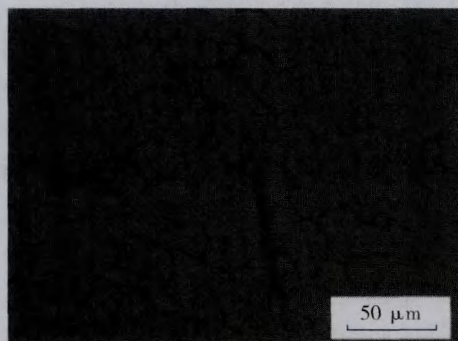
2.1.3 焊接接头的显微组织

采用 ER5356 焊丝的焊接接头各区显微组织如图 4 所示。图 4a 为焊缝区 WZ 和熔合区 FZ 熔合线附近的组织,可以看出熔合线为焊缝和母材之间的过渡区,在半熔化金属基底上外延生长,依稀可见其边界。熔合线靠近焊缝一侧可见树枝状晶,组织较为粗大,这是由于在焊接热循环作用下,母材晶粒易过热粗化,焊缝这种粗大的组织将会严重增加其脆性。图 4b 为焊缝中心组织照片,可见等轴晶,其晶界完整清晰。由图 4a 中的树枝状晶转变到图 4b 中的等轴晶,在焊接过程中,液相中温度梯度很小时,在液相中形成很宽的成分过冷区,此时不仅在结晶前沿形成粗大的树枝状晶,而且在液相的内部生核,产生新的晶粒,这些晶粒的四周不受阻碍,

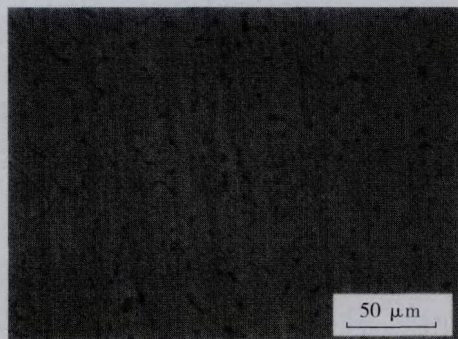
可以自由成长,形成等轴晶^⑥。图4c为热影响区(HAZ)显微组织,该区于焊缝区和母材区之间,属于未发生熔化的部分,该区晶粒粗大,严重地降低了热影响区的韧性。



a WZ 和 FZ



b WZ



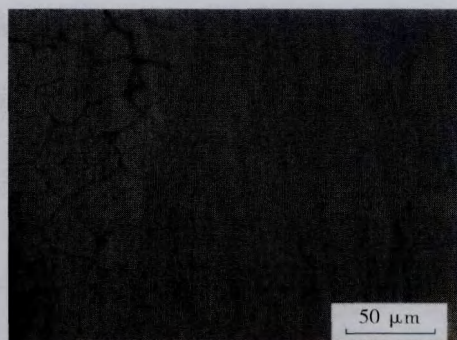
c HAZ

图4 采用ER5356焊丝的焊接接头各区的显微组织

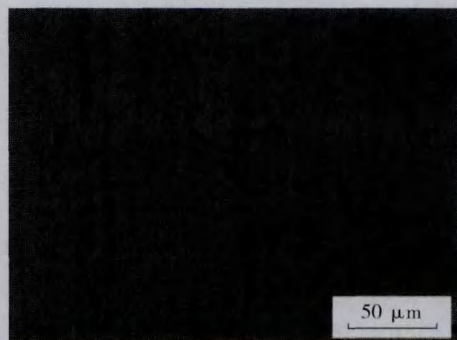
图5为采用ER4043焊丝的焊接接头各区的显微组织。图5a为焊缝区WZ和熔合区FZ熔合线附近的组织,可以看出明显熔合线边界。图5b为焊缝中心组织照片,可见晶界完整清晰的等轴晶粒。图5c为热影响区(HAZ)显微组织,该区位于焊缝区和母材区之间,属于未发生熔化的部分,该区晶粒粗大,降低热影响区的韧性。

2.1.4 焊接接头缺陷

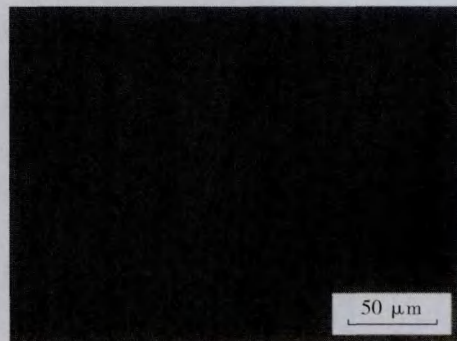
采用6061和6101铝合金填充后出现的焊接缺



a WZ 和 FZ



b WZ



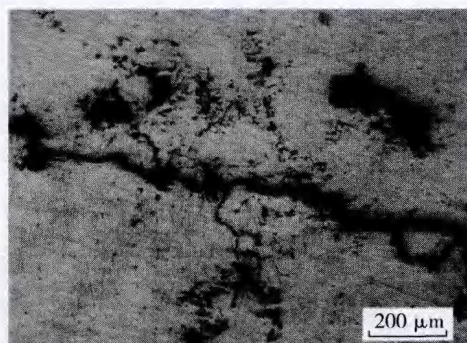
c HAZ

图5 采用ER4043焊丝的焊接接头各区的显微组织

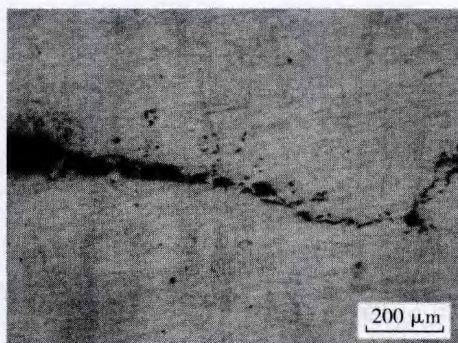
陷如图6所示,该缺陷为焊接热裂纹,用低倍观察很容易发现焊接接头的缺陷,焊接裂纹是在焊接应力及其他致脆因素共同作用下,焊接接头局部区域的金属原子结合力遭到破坏而形成的新界面而产生的缝隙。由于该合金为可热处理强化合金,热裂纹易出现在母材近焊缝区域。肉眼能见到的宏观裂纹,严重影响着焊接结构的使用性能和安全可靠。与其他两种焊丝相比,采用ER5356和ER4043焊丝的焊接接头基本上没有明显的热裂纹缺陷出现。

3 结论

从铝合金焊接工艺角度开展汽车用铝合金TIG焊接工艺的研究,主要针对铝合金母材、焊丝、焊接



a 采用 6061 铝合金填充



b 采用 6101 铝合金填充

图 6 焊接缺陷

工艺和焊接接头性能开展研究。

(1)从焊接试样拉伸试验来看,只有 ER5356 焊丝的焊接试样断在焊缝外,其他三种均断裂在焊缝位置。采用 ER5356 焊丝的抗拉强度为母材的63.2%,断后延伸率为母材的62.5%。采用 6101 和 6061 焊丝的焊接试样出现焊接热裂纹。

(2)通过对四种不同焊丝的焊接接头硬度测试,ER5356 焊丝的焊缝硬度和母材比较接近,其他三种均高于母材。焊缝的硬度过高,塑性降低,应力比较集中的焊缝位置也是造成拉伸断口出现在焊缝的原因之一。

(3)采用 ER5356 焊丝和 ER4043 焊丝的焊接接头在焊缝区域可见晶界清晰的等轴晶粒,其热影响区的晶粒较粗大。

(4)通过对显微组织和力学性能的对比分析,

四种填充材料中,ER5356 适合作为 6101 和 6061 铝合金板材的焊接填充材料。

参考文献:

- [1] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金焊接[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 姜银方,杨继昌,陈 炜,等. 铝合金拼焊板技术研究进展[J]. 农业机械学报,2004,35(2):163-167.
- [3] 邓升斌,狄 欧,何建国,等. LF6 铝合金薄板搅拌摩擦焊工艺研究[J]. 热加工工艺,2004(12):29-30.
- [4] 戴文辉.5A06-O 铝合金蒙皮的拼焊工艺[J].电焊机,2004,34(4):27-29.
- [5] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(二)第 3 版[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [6] 汪洪峰,左敦稳,王宏宇,等. 5554 铝合金 TIG 焊缝组织与性能[J]. 南京航空航天大学学报,2010,42(6):753-757.

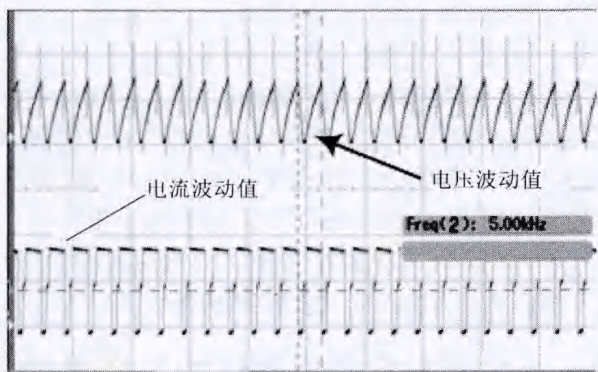


图 9 焊接电压和电流曲线

参考文献:

- [1] 潘际奎.现代弧焊控制[M].北京:机械工业出版社,2000.

- [2] 西门子(中国)有限公司.深入浅出西门子 S7-200PLC(第 2 版).北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [3] 曹太强,许建平,徐顺刚.光伏发电在电动阀门中的应用[J].电子科技大学报,2009,38(1):92-96.
- [4] 陈晓伟,刘华毅.1000A 悬臂式埋弧自动焊机 PLC 控制系统[D].辽宁:大连理工大学,2005.
- [5] 黎振龙,潘厚宏.埋弧焊 H 桥送丝电路研究[J].电焊机,2007,37(11):53-55.
- [6] 杨兴瑶.电动机调速的原理及系统[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [7] 王振民,董 飞,薛家祥,等.GMAW 焊送丝机 PWM 可逆调速系统[J].电焊机,2007,37(2):34-36.
- [8] 陈善本.焊接过程现代控制技术[M].黑龙江:哈尔滨工业大学出版社,2001.