



图7 外套与中间轴氩弧焊



图8 氩弧焊后热处理

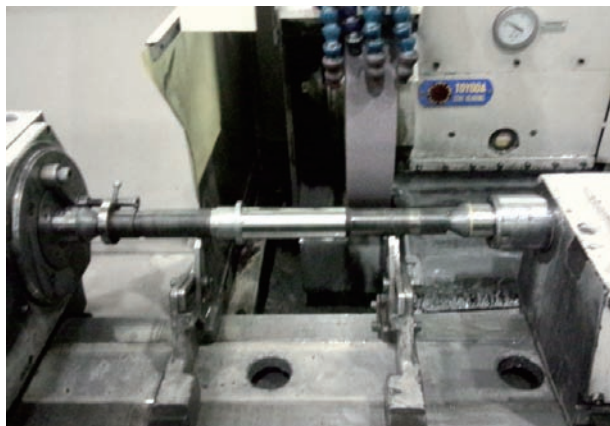


图9 组件精加工

≤0.01mm，精加工胀套和焊接部位至设计要求值；

(3) 加工完毕后检测跳动是否符合图纸要求。

3.4 膨胀量检测:

拧紧胀塞，要求胀套直径膨胀量 > 最小计算膨胀量，且芯轴组件无渗油漏油（如表2）。

4 膨胀芯轴效果验证（如表3-5）

从角度转换后看：

(1) 各位置对应不平衡量的角度范围主要集中在60° 范围内，说明膨胀芯轴对叶轮不平衡量影响较小；

(2) 各位置对应不平衡量的重复出现角度在20° 范围内，说明重复精度较好（如图10-11）。

上图左侧为普通芯轴测试不平衡量，右侧为膨胀芯轴测试不平衡量，对比两图可看出，膨胀芯轴测试的叶轮不平衡量均集中在20° 内，优于左侧测量结果。

5 结语

通过理论与实验论证，研发出了适用于叶轮动平衡的膨胀芯轴，使动平衡过程中叶轮与膨胀芯轴具有

表2 膨胀芯轴测量数据

序号	规格	胀前 (mm)	胀后 (mm)	膨胀量 (mm)	膨胀前跳动 (mm)	膨胀后跳动 (mm)
1	Φ40	39.980	40.024	0.044	0.015	0.015
2	Φ48	47.970	48.02	0.050	0.008	0.015
3	Φ52	51.988	52.053	0.065	0.005	0.008
4	Φ40	39.964	40.017	0.053	0.015	0.012
5	Φ42	41.980	42.022	0.042	0.005	0.01
6	Φ62	61.992	62.043	0.051	0.005	0.010

表3 芯轴初始动平衡量测量

序号	参数	具体值	芯轴初始动平衡量A端 (g)	芯轴初始动平衡量B端 (g)
1	a (mm)	103.5	0.111	0.79
2	b (mm)	133		
3	c (mm)	98		
4				
5	R1 (mm)	21		
6	R2 (mm)	43		
7	轴重 (kg)	3.6		

表4 芯轴套上叶轮初始动平衡量1

项目	具体值					
	0	60	120	180	240	300
叶轮与芯轴相对位置角度(°)	0	60	120	180	240	300
吸气测动平衡量 (g)	0.459	0.621	0.662	1.04	1.01	0.805
角度位置(°)	261	161	97	52	16	328
角度转换后	261	221	217	232	256	268
排气测动平衡量 (g)	0.543	0.48	0.49	0.714	0.717	0.672
角度位置(°)	53	335	251	205	159	109
角度转换后	53	35	11	25	39	49

(下转第38页)

铝合金板焊接工艺试验验证浅析

郭鑫

中国第一汽车集团股份有限公司发展制造部, 长春, 130011

摘要: 结构轻量化和节能降耗目前已成为各大汽车生产厂商提高核心竞争力的关键。采用铝合金是汽车轻量化及环保、节能、提速和运输高效的重要途径之一。用铝合金结构代替传统钢结构, 可使汽车重量减轻30%~40%, 制造发动机可减轻30%, 制造车轮可减轻50%。美国、日本、德国是在汽车生产上采用铝合金最多的国家, 国内的汽车制造商还未能将该技术成熟应用于汽车生产中。其中一个主要原因在于采用铝合金后, 铝合金与钢异种金属之间的连接不可避免。而铝合金与钢之间的热物理化学性能差异巨大, 开发稳定可靠的铝合金与钢之间异种材料连接技术亟待突破。基于以上背景, 本文从对汽车用铝合金板焊接工艺试验验证研究出发, 运用多种焊接方法对多种不同材料组合(铝/钢)板材样片进行焊接试验, 并进行较为细致的焊接质量、强度分析。对汽车用铝合金板焊接工艺技术做出了初步探索, 为集团公司整车结构轻量化和节能降耗方面做出有益尝试及技术积累。

关键词: 铝合金板; 焊接工艺; 异种金属; 连接技术

Verification of Welding Process Test for Aluminum Alloy Plate

GUOXIN

Development and manufacturing department Technical department, Changchun,

Abstract: Lightweight structure, energy conservation and consumption reduction have now become the key for major automobile manufacturers to improve their core competitiveness. Adopting aluminum alloy is one of the important ways to reduce weight, protect environment, save energy, speed up speed and transport efficiency of automobiles. Replacing traditional steel structures with aluminum alloy structures can reduce the weight of automobiles by 30% - 40%, engine manufacturing by 30%, and wheel manufacturing by 50%. The United States, Japan, and Germany are the countries that use the most aluminum alloy in automobile production. domestic automobile manufacturers have not yet been able to apply this technology to automobile production. One of the main reasons is that the connection between aluminum alloy and steel dissimilar metals is inevitable after aluminum alloy is used. However, there is a huge difference in thermo-physical and chemical properties between aluminum alloy and steel. it is urgent to develop a stable and reliable connection technology of dissimilar materials between aluminum alloy and steel. Based on the above background, starting from the experimental verification and research on the welding process of aluminum alloy plates for automobiles, this paper uses a variety of welding methods to carry out welding tests on samples of various combinations of materials (aluminum / steel), and carries out a more detailed analysis of welding quality and strength. The welding technology of aluminum alloy plates for automobiles is preliminarily explored, which makes beneficial attempts and technological accumulation in the aspects of lightweight structure, energy conservation and consumption reduction of the entire automobile of the group company.

Keywords: Aluminum alloy plate, welding process, dissimilar metal, connection technology

1 技术目的

结构轻量化和节能降耗目前已成为各大汽车生产厂商提高核心竞争力的关键。采用铝合金是汽车轻量化及环保、节能、提速和运输高效的重要途径之一。用铝合金结构代替传统钢结构,可使汽车重量减轻30%~40%,制造发动机可减轻30%,制造车轮可减轻50%。美国、日本、德国是在汽车生产上采用铝合金最多的国家,国内的汽车制造商还未能将该技术成熟应用于汽车生产中。其中一个主要原因在于采用铝合金后,铝合金与钢异种金属之间的连接不可避免。而铝合金与钢之间的热物理化学性能差异巨大,开发稳定可靠的铝合金与钢之间异种材料连接技术亟待突破。基于以上背景,本项目进行汽车用铝合金板焊接工艺试验验证研究,积累汽车用铝合

金板焊接工艺技术,推动铝合金在国内汽车中的工程化应用。

本项目运用多种焊接方法对多种不同材料组合(铝/钢)板材样片进行焊接试验工作,主要焊接及连接方法包括:

- ① FSW搅拌摩擦点焊:铝/钢组合板材样片;
- ② MIG熔钎焊:铝/钢组合板材样片;
- ③ TIG熔钎焊:铝/钢组合板材样片;
- ④ TOX铆接:铝/钢组合板材样片;

焊接完成后,利用X光、超声、金相显微镜、电镜等检测设备对焊接后的各种板材样片进行缺陷形貌与微观组织表征分析,检验焊接质量;对焊接后的各种板材样片进行拉伸、剪切强度测试,检验焊接强度;

经统计,不计算四种工艺摸索试验次数,本项目一共进行有效试验次数504组,一共使用样片1008个。

2 试验材料及试验方法

2.1 试验材料

本试验所用铝合金板为1.0mm厚Novelist AC 170 PX 铝合金板和1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板,所用钢板为1.2mm厚ST06 Z镀锌钢板和1.0mm厚ST13钢板。铝合金板微观组织比较均匀,ST06 Z镀锌钢板镀锌层平均厚度为7.1μm。母材拉伸性能见表1。1.0mm厚Novelist AC170 PX 铝合金板的平均抗拉强度为213MPa,其中,横向(垂直于轧制方向)抗拉强度为207MPa,纵向(平行于轧制方向)抗拉强度为218MPa;而1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板的平均抗拉强度为202MPa,横向和纵向抗拉强度较为接近;ST06 Z镀锌钢板的抗拉强度为317MPa;ST13钢板的抗拉强度为283MPa。

2.2 试验方法

2.2.1 试验参照标准(见表2)

2.2.2 试验设备(见表3)

2.2.3 试验尺寸

铝合金板TIG和MIG对接焊试验时,试件尺寸为200mm长、100mm宽。铝合金/钢板TIG和MIG搭接焊时,铝合金板在上,钢板在下,搭接宽度为18mm。焊接完成后,从焊件中垂直于焊缝切取试样进行抗拉强度试验和疲劳强度试验,抗拉强度试验试样尺寸见图1所示,疲劳强度试验所用试样尺寸如图2所示。

采用回填式搅拌摩擦点焊(FSSW)方法焊接铝合金/钢板搭接接头,焊点直径为9mm。拉伸试样尺寸为25 mm×80mm,如图3所示;剥离试样尺寸为25 mm×80mm,如图4所示;疲劳强度试验所用试样尺寸为40

表1 试验母材拉伸性能

材料	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)
Novelist AC 170 PX	213	207
Aleris Superlite 200 ST	202	202
ST06 Z镀锌钢	317	312
ST13钢板	283	133

表2 试验参照标准清单

序号	试验名称	标准编号及名称
1	TIG焊	GB/T 22086 铝及铝合金弧焊推荐工艺
2	MIG焊	GB/T 22086 铝及铝合金弧焊推荐工艺
3	FSSW	Q/RJ 283.1-2008 变形铝及铝合金搅拌摩擦焊通用技术条件
4	TOX冲铆连接	由苏州托克斯冲压设备有限公司(德国独资)完成
5	金相组织	GB/T 26955 金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验
6	拉伸性能	GB/T 228 金属材料室温拉伸试验方法 GB/T 2651 焊接接头拉伸试验方法
7	硬度	GB/T 4340 金属材料 维氏硬度试验
8	X射线探伤	JB-4730 承压设备无损检测第2部分:射线检测
9	扫描断口	GB/T 26955 金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验
10	疲劳	GB 3075-2008 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法

表3 主要试验设备名称及型号

序号	试验名称	标准编号及名称
1	TIG焊	YC-500WX4N钨极氩弧焊机
2	MIG焊	福尼斯CMT焊机
3	FSSW	HT-JDL6x12/2回填式搅拌摩擦点焊焊机
4	TOX冲铆连接	TOX气液增力缸式冲压设备
5	金相组织	LEICA MEF4A光学显微镜
6	拉伸性能	DNS 100型万能拉伸试验机
7	硬度	MVC-1000B型数显显微维氏硬度计
8	超声检测	超声波SM-J5B-300Scan扫描系统
9	扫描断口分析	JSM-5600LV型扫描电镜
10	疲劳	日本岛津公司电液伺服疲劳试验机

mm×155mm, 如图5所示。

采用TOX气液增力缸式冲压设备连接铝合金/钢板搭接接头, 接头示意图见图6。抗剪试样尺寸为25mm×80mm, 见图7; 疲劳试样尺寸为40×155mm, 见图8。抗拉试样示意图见图9, 连接点至弯边最小距离为7mm。

2.2.4 试验尺寸

各试验所涉及的表征参量汇总见表4。

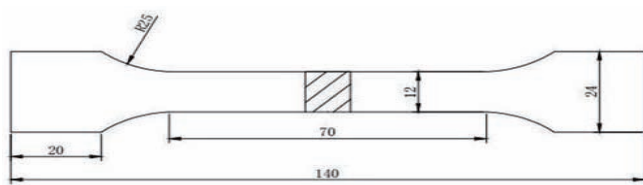


图1 铝合金板TIG和MIG对接焊拉伸试样尺寸

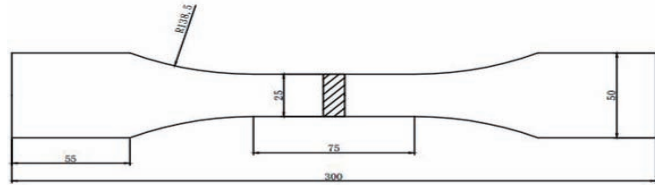


图2 铝合金板TIG和MIG对接焊疲劳试样尺寸

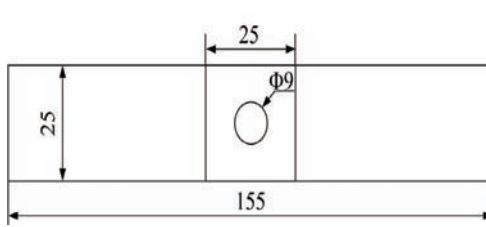


图3 回填式搅拌摩擦点焊拉伸试样尺寸

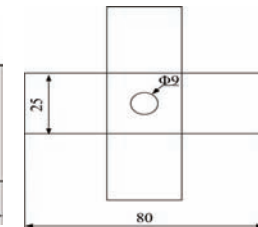


图4 回填式搅拌摩擦点焊剥离试样尺寸

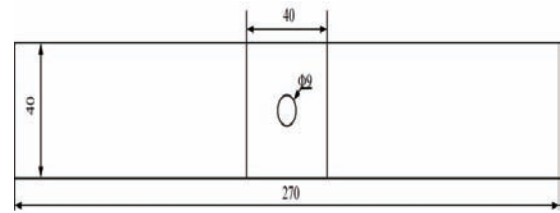


图5 回填式搅拌摩擦点焊疲劳试样尺寸

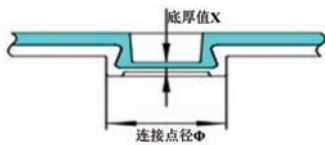


图6 TOX冲铆连接接头示意图

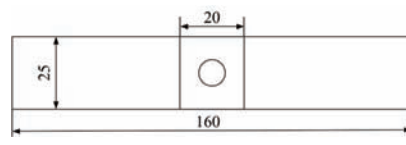


图7 TOX冲铆连接接头抗剪试样尺寸

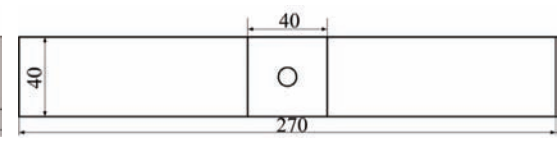


图8 TOX冲铆连接接头疲劳试样尺寸

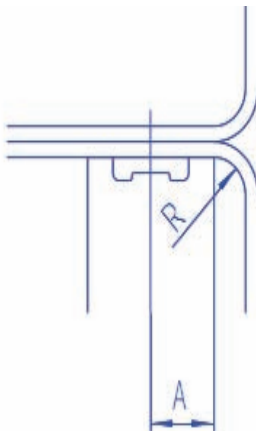


图9 TOX冲铆连接接头抗拉试样示意图



3 铝/钢组合板材样片焊接试验结果

由于论文字数控制, 只对全自动熔化极气体保护焊(MIG焊)焊接试验结果进行举例说明, 全自动钨极氩弧焊(TIG焊)、回填式搅拌摩擦焊(FSSW)和TOX铆接试验结果省略。

3.1 MIG焊

铝/钢组合板材样片全自动MIG焊共进行126组试验,使用样片252个,其中铝合金样片126个,钢板样片126个。

3.1.1 焊缝形貌

分别进行了1.0mm厚Novelist AC 170 PX 铝合金板和1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板与1.2mm厚ST06 Z镀锌钢板异质材料MIG搭接焊工艺试验,保护气采用纯氩气,气体流量20L/min。采用的焊丝分别为ER4043、ER4047和ER5356,焊丝直径为1.2mm。1.0mm厚Novelist AC 170 PX 铝合金板/1.2mm厚镀锌钢板、1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板/1.2mm厚镀锌钢板MIG搭接焊试样典型照片分别如图10和图11。从试件照片可见,在进行铝合金/镀锌钢异质材料MIG焊时,能够获得外观较好的焊缝,焊接过程中会产生少量飞溅。

别进行了1.0mm厚Novelist AC 170 PX 铝合金板和1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板与1.0mm厚ST13钢板异质材料MIG搭接焊工艺试验,保护气采用纯氩气,气体流量20L/min。采用4047实心焊丝,焊丝直径为1.2mm。1.0mm厚Novelist AC 170 PX 铝合金板/1.0mm厚ST13钢板、1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板/1.0mm厚ST13钢板MIG搭接焊试样照片分别如图12和图13。采用ER4047焊丝进行铝合金/ST13钢异质材料MIG焊时,能够获得外观较好的焊缝。

3.1.2 拉伸性能

完成1.0mm厚Novelist AC 170 PX 铝合金板/1.2mm厚镀锌钢板、1.5mm

表4 试验项目表征参量

序号	试验名称	表征参量
1	TIG焊(对接/搭接)	焊缝形貌
2	MIG焊(对接/搭接)	焊缝形貌
3	FSSW(搭接)	焊缝形貌
4	TOX冲铆连接	铆点形貌
5	金相组织	组织相、晶粒
6	拉伸性能	抗拉强度、剪切强度
7	硬度	维氏硬度(HV)
8	超声检查	孔洞、弱连接
9	扫描断口分析	断口形貌
10	疲劳	循环周次



图10 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST06Z镀锌钢MIG搭接焊试样照片
(焊接参数: ER4043焊丝, 焊接电流55A, 焊速70cm/min, 送丝速度2.5m/min)



图11 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST06Z镀锌钢MIG搭接焊试样照片
(焊接参数: ER4043焊丝, 焊接电流75A, 焊速70cm/min, 送丝速度4.2m/min)



图12 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊试样照片
(焊接参数: 4047实心焊丝, 焊接电流66A, 焊速70cm/min, 送丝速度3.4m/min)



图13 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊试样照片
(焊接参数: 4047实心焊丝, 焊接电流85A, 焊速70cm/min, 送丝速度5.1m/min)

厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板/1.2mm厚镀锌钢板MIG搭接焊后,从每个焊接接头中垂直于焊缝切取3个试样进行室温拉伸测试,所得典型拉伸曲线分别如图14和图15,典型拉伸断裂照片如图16和图17,焊接工艺参数及对应的拉伸试验结果如表5。

对于1.0mm厚Novelist AC 170 PX 铝合金板/1.2mm厚镀锌钢板MIG搭接焊,采用ER4047焊丝获得的接头抗拉强度最高为185MPa,达到铝合金母材强度的87%;采用ER4043焊丝获得的接头抗拉强度最高为189MPa,达到铝合金母材强度的89%;采用ER5356焊丝获得的接头抗拉强度最高为157MPa,达到铝合金母材强度的74%。

对于1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板/1.2mm厚镀锌钢板MIG搭接焊,采用ER4047焊丝获得的接头抗拉强度最高为137MPa,达到铝合金母材强度的68%;采用ER4043焊丝获得的接头抗拉强度最高为148MPa,达到铝合金母材强度的73%;采用ER5356焊丝获得的接头抗拉强度最高为77MPa,达到铝合金母材强度的38%。

采用ER4043和ER4047焊丝获得的1.0mm厚Novelist AC 170 PX 铝合金板/1.2mm厚镀锌钢板和1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板/1.2mm厚镀锌钢板异质材料MIG搭接焊接头拉伸强度较高,断裂位置主要为焊缝;而采用ER5356焊丝获得的MIG搭接接头拉伸强度相对较低,断裂位置主要为界面层,是因为铝合金和钢在高温时容易结合生成FeAl3和Fe2Al5金属间化合物,这两种金属间化合物脆而硬,而且异质金属焊接接头中残余应力较大,因此铝合金/钢异质金属MIG焊接接头的韧性较差。

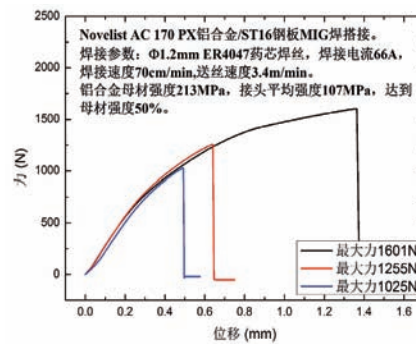


图18 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊拉伸断裂曲线

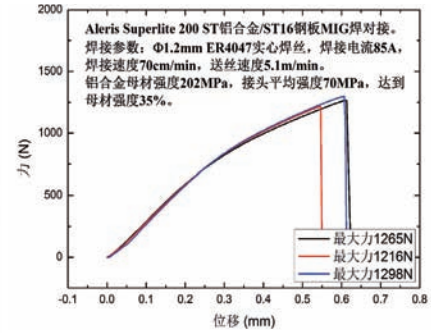


图19 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊拉伸断裂曲线

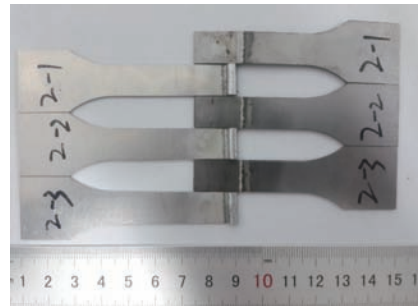


图20 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊接头拉伸断裂照片
(焊接参数: 4047实心焊丝, 焊接电流66A, 焊速70cm/min, 送丝速度3.4m/min)

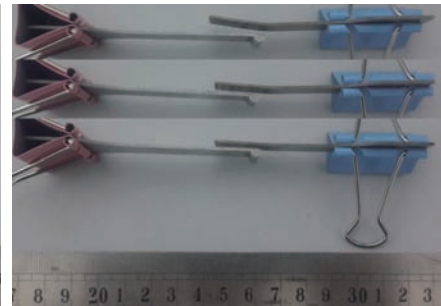


图21 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊接头拉伸断裂照片
(焊接参数: 4047实心焊丝, 焊接电流85A, 焊速70cm/min, 送丝速度5.1m/min)

表6 铝合金/ST13钢板MIG搭接焊接头拉伸测试结果

母材	焊丝牌号	焊接电流 A	送丝速度 m/min	焊接速度 cm/min	抗拉强度平均值 MPa
Novelist AC 170 PX铝合金板/ST13钢板	4047	55	2.5	70	-
		66	3.4	70	107
Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST13钢板	4047	66	3.4	70	-
		75	4.2	70	61
		85	5.1	70	70

3.1.3 金相组织

从1.0mm厚Novelist AC 170 PX 铝合金板/1.2mm厚镀锌钢板、1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板/1.2mm

厚镀锌钢板MIG搭接焊接头上,垂直于焊缝方向切取试样,在金相试样磨抛机上进行粗磨、精磨和抛光,进行金相分析。接头形貌分别见图22和图23。

铝合金板边缘处的母材与铝合金焊丝一起熔化后，在镀锌钢板表面润湿、铺展，而镀锌钢母材未熔化，因此这种铝合金熔化、钢板未熔化的焊接方法又称为熔钎焊，即铝合金侧为熔

焊，而钢侧为钎焊。熔化的部分铝合金母材和填充焊丝一起凝固后形成焊缝，与镀锌钢板实现了冶金结合。焊缝中存在气孔，甚至在焊缝、铝合金母材、钢板三角区域有裂纹。

从界面层处微观组织可以清晰看到，焊缝与钢板表面紧密结合，没有裂纹或气孔产生。而焊缝中容易生成气孔或晶间裂纹，热影响区晶粒比焊缝区域晶粒粗大。

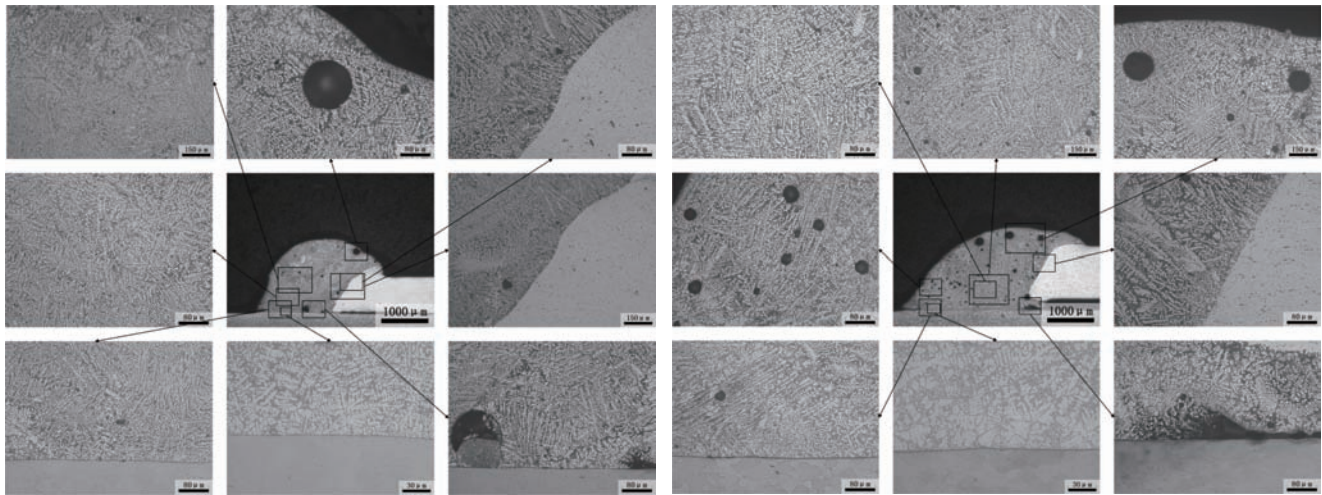


图22 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST06Z镀锌钢MIG搭接接头形貌
(焊接参数: ER4043焊丝, 焊接电流55A, 焊速70cm/min, 送丝速度2.5m/min)

图23 Aleris Superlite200 ST铝合金板/ST06Z镀锌钢MIG搭接接头形貌
(焊接参数: ER4043焊丝, 焊接电流66A, 焊速70cm/min, 送丝速度3.4m/min)

Novelist AC 170 PX铝合金板/ST13MIG与Aleris Superlite200 ST铝合金板/ST13MIG搭接接头形貌，与上述图片所示相近不再赘述。

3.1.4 硬度分布

在采用ER4043和ER4047焊丝焊接的铝合金/镀锌钢板MIG搭接接头不同部位测试了显微硬度分布，测试载荷为100g，加载时间为15s，接头显微硬度分布曲线如图24。

从显微硬度分布可以看出，界面层附近的硬度高于焊缝中间位置，主要是由于在界面层附近会生成Fe-Al金属间化合物，而金属间化合物脆而硬。焊缝中如果存在大量的Fe-Al金属间化合物，接头力学性能会降低。通过控制焊接热输入，焊接时采用小的焊接线能量，同时，由于镀锌钢表面镀锌层会阻碍熔融的铝合金与钢板直

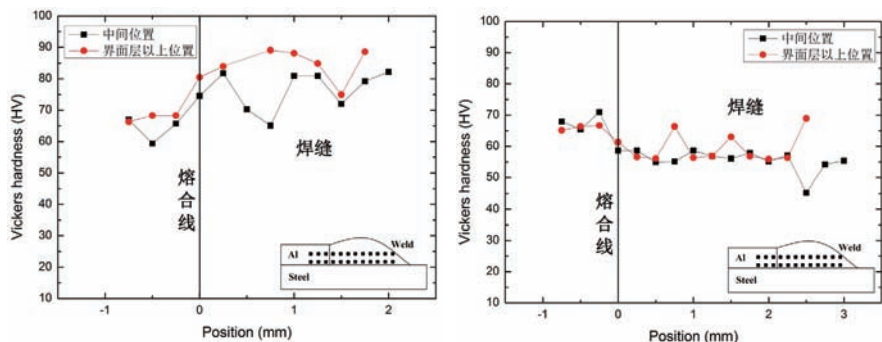


图24 不同焊接参数下接头中的显微硬度分布

接接触，从而有效抑制了焊缝中Fe-Al金属间化合物的产生，进而改善了接头微观组织和力学性能。

从硬度值分布可以看出，使用ER4043焊丝得到的焊接接头热影响区硬度值比焊缝处稍低，而使用ER4047焊丝得到的焊接接头热影响区硬度值比焊缝处稍高。

(1) Novelist AC 170 PX铝合金/ST06Z镀锌钢MIG搭接接头，

ER4043焊丝，焊接电流55A，焊接速度70cm/min，送丝速度2.5m/min，抗拉强度189MPa，断于热影响区。

(2) Aleris Superlite 200 ST铝合金/ST06Z镀锌钢MIG搭接接头，ER4047焊丝，焊接电流66A，焊接速度70cm/min，送丝速度3.4m/min，抗拉强度137MPa，断于焊缝。

在采用ER4047实心焊丝焊接的铝合金/ST13钢板MIG搭接接头不同

部位测试了显微硬度分布，测试载荷为100g，加载时间为15s，接头显微硬度分布曲线如图25和图26。

从显微硬度分布可以看出，界面层附近的硬度高于焊缝中间位置，主要是由于在界面层附近会生成Fe-Al金属间化合物，而金属间化合物脆而硬。焊缝中如果存在大量的Fe-Al金属间化合物，接头力学性能会降低。热影响区硬度值比焊缝处稍高。通过控制焊接热输入，焊接时采用小的焊接线能量，从而有效抑制了焊缝中Fe-Al金属间化合物的产生，进而改善了接头微观组织和力学性能。

3.1.5 断口形貌

铝合金/镀锌钢板MIG搭接焊接接头拉伸断口形貌如图27~图30。

对于1.0mm厚Novelist AC 170 PX铝合金板/1.2mm厚ST06Z镀锌钢板MIG搭接焊，采用ER4043焊丝和ER4047焊丝获得的焊接接头主要断裂位置为焊缝，断口存在大量韧窝，主要为韧性断裂。

对于1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST铝合金板/1.2mm厚ST06Z镀锌钢板MIG搭接焊，采用ER4047焊丝和ER4043焊丝获得的接头拉伸断裂全部发生在焊缝，以韧性断裂为主。

3.1.6 疲劳性能

对铝合金/镀锌钢MIG搭接焊接接头进行了疲劳性能测试。疲劳试验采用正弦波常幅加载，加载频率为4Hz，应力比为0.1，第一次试验峰值 $F_{max}(1.0mm)=2.66kN$ ， $F_{max}(1.5mm)=3.78kN$ （均为铝合金母材抗拉强度的50%），试验谷值 $F_{min}(1.0mm)=0.266kN$ ， $F_{min}(1.5mm)=0.378kN$ ，设定循环次数为20000次，试验前用200#砂纸仔

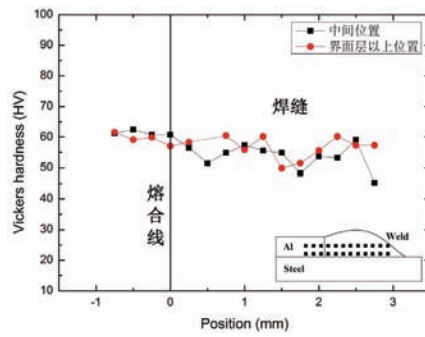


图25 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊接接头显微硬度分布（4047实心焊丝，焊接电流66A，焊速70cm/min，送丝速度3.4m/min，抗拉强度107MPa，断于界面层）

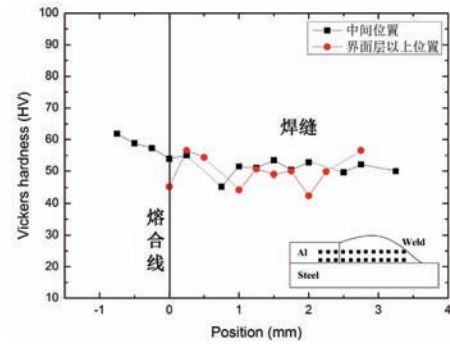


图26 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊接接头典型部位微观组织（4047实心焊丝，焊接电流85A，焊速70cm/min，送丝速度5.1m/min，抗拉强度70MPa，断于界面层）

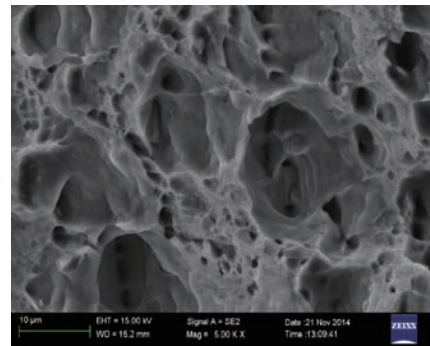
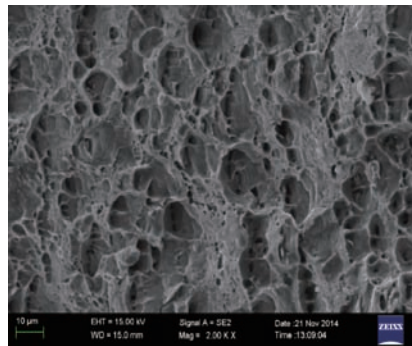


图27 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST06Z镀锌钢板MIG搭接焊接接头拉伸断口形貌（ER4043焊丝，焊接电流55A，焊接速度70cm/min，送丝速度2.5m/min）

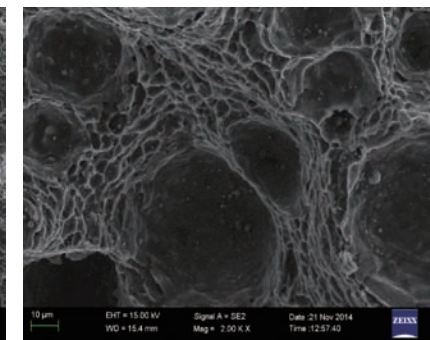
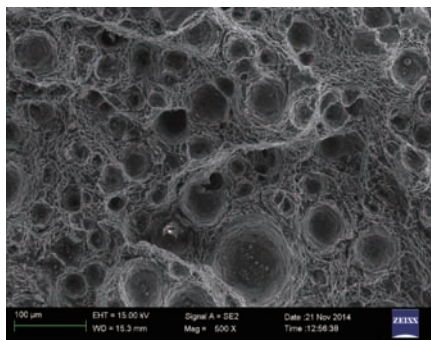


图28 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST06Z镀锌钢板MIG搭接焊接接头拉伸断口形貌（ER4047焊丝，焊接电流55A，焊接速度70cm/min，送丝速度2.5m/min）

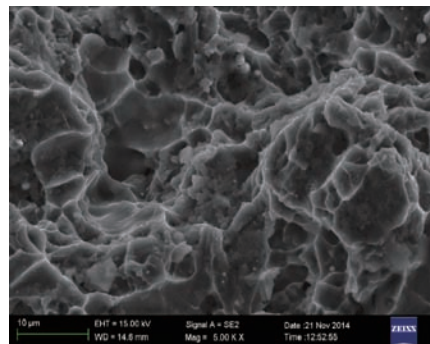
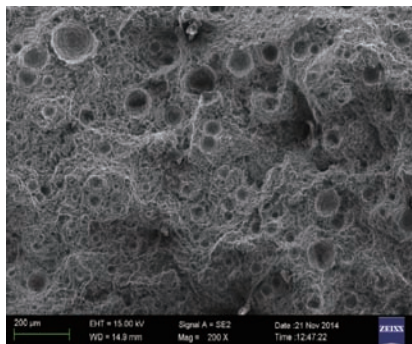


图29 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST06Z镀锌钢板MIG搭接焊接接头拉伸断口形貌（ER4043焊丝，焊接电流66A，焊接速度70cm/min，送丝速度3.4m/min）