



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。

铝合金板焊接工艺试验验证浅析（上）

□ 中国第一汽车集团股份有限公司 / 郭鑫

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，可使汽车质量减轻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完全将该技术成熟地应用于汽车生产中。其中一个主要原因在于采用铝合金后，铝合金与

钢等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，推动铝合金在国产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。

试验材料及试验方法

1. 试验材料

本试验所用铝合金板为1mm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1mm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7.1mm。母材拉伸性能见表1。1mm厚Novelist AC 170 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. 试验方法

- (1) 试验参照标准见表2。
- (2) 试验设备见表3。

(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如图1所示，疲劳强度试验所用试样尺寸如图2所示。

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

试验名称	标准编号及名称
TIG焊	GB/T 22086 铝及铝合金弧焊推荐工艺
MIG焊	GB/T 22086 铝及铝合金弧焊推荐工艺
FSSW	Q/RJ 283.1—2008 变形铝及铝合金搅拌摩擦焊通用技术条件
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
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
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
硬度	GB/T 4340 金属材料 维氏硬度试验
X射线探伤	JB—4730 承压设备无损检测第2部分：射线检测
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
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

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

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25mm×80mm，如图3所示；剥离试样尺寸为25mm×80mm，如图4所示；疲劳强度试验所用试样尺寸为40mm×155mm，如图5所示。

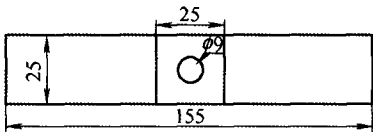


图3 回填式搅拌摩擦点焊拉伸试样尺寸

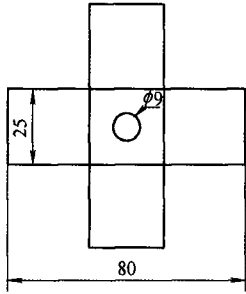


图4 回填式搅拌摩擦点焊剥离试样尺寸

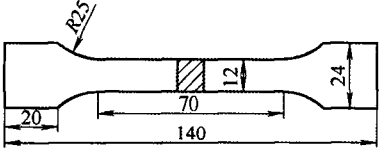


图1 铝合金板TIG和MIG对接焊拉伸试样尺寸

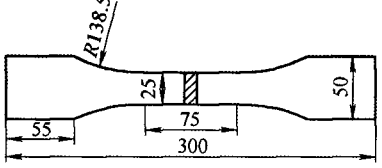


图2 铝合金板TIG和MIG对接焊疲劳试样尺寸

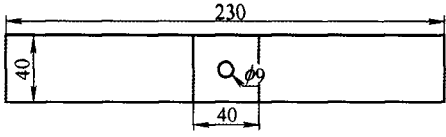


图5 回填式搅拌摩擦点焊疲劳试样尺寸

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

各试验所涉及的表征参量汇总表4。

铝/钢组合板材样片焊接试验结果

本文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。

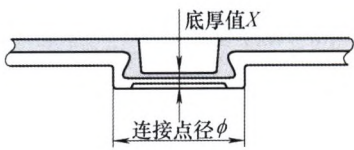


图6 TOX冲铆连接接头示意

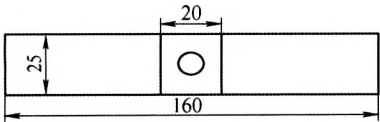


图7 TOX冲铆连接接头抗剪试样尺寸

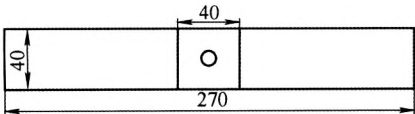


图8 TOX冲铆连接接头疲劳试样尺寸

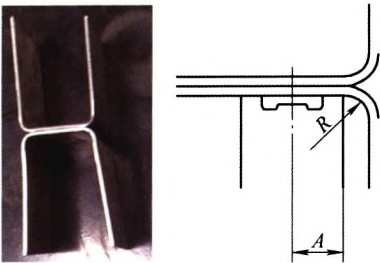


图9 TOX冲铆连接接头抗拉试样示意

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。

（1）焊缝形貌。分别进行了厚1mm Novelist AC 170 PX 铝合金板、厚1.5mm Aleris Superlite 200 ST 铝合金板与厚1.2mm 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

焊试样典型照片分别如图10和图11所示。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。

分别进行了厚1mm Novelist AC 170 PX 铝合金板、厚1.5mm Aleris Superlite 200 ST 铝合金板与厚1mm 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实芯焊丝，焊丝直径为1.2mm。厚1mm Novelist AC 170 PX 铝合金板/厚1mm ST13钢板、1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板/厚1mm ST13钢板MIG搭接焊试样照片分别如图12和图13所示。采用ER4047焊丝进行铝合金



图10 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST06Z镀锌钢MIG搭接焊试样（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（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（焊接参数：4047实芯焊丝，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（焊接参数：4047实芯焊丝，焊接电流85A，焊速70cm/min，送丝速度5.1m/min）

表4 试验项目表征参量

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

/ST13钢异质材料MIG焊时，能够获得外观较好的焊缝。

(2) 拉伸性能。完成1mm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所示，典型拉伸断裂照片如图16和图17所示，焊接工艺参数及对应的拉伸试验结果见表5。（待续）

AUTO1950

Novelist AC 170 PX 铝合金/镀锌钢MIG搭接
焊接参数：φ1.2mm ER4043实芯焊丝，焊接电流55A，
焊接速度70cm/min，送丝速度2.5m/min
铝合金母材强度213MPa，接头平均强度189MPa，达到
母材强度89%

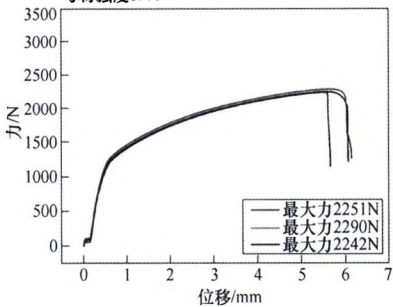


图14 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST06Z 镀锌钢MIG搭接焊拉伸断裂曲线

Aleris Superlite 200 ST 铝合金/镀锌钢MIG搭接
焊接参数：φ1.2mm ER4043实芯焊丝，焊接电流75A，
焊接速度70cm/min，送丝速度4.2m/min
铝合金母材强度202MPa，接头平均强度148MPa，达到
母材强度73%

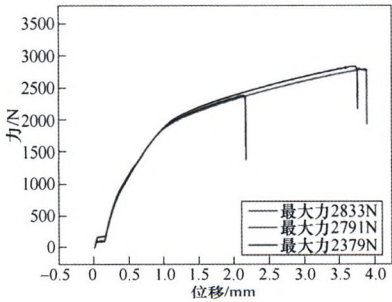


图15 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ ST06Z镀锌钢MIG搭接焊拉伸断裂曲线

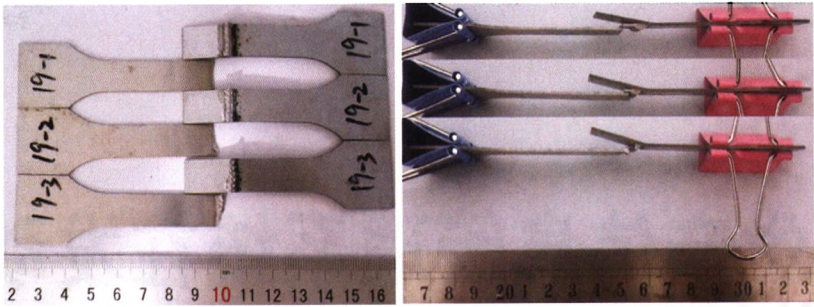


图16 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST06Z镀锌钢MIG搭接焊接头拉伸断裂照片（焊接参数：ER4043焊丝，焊接电流55A，焊速70cm/min，送丝速度2.5m/min）

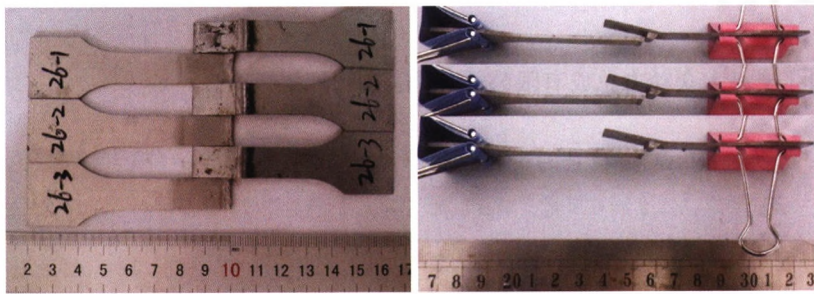


图17 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST06Z镀锌钢MIG搭接焊接头拉伸断裂照片（焊接参数：ER4043焊丝，焊接电流75A，焊速70cm/min，送丝速度4.2m/min）

表5 铝合金/镀锌钢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
1mm厚 Novelist AC 170 PX铝合 金板/1.2mm 厚镀锌钢	ER4043	55	2.5	70	189
		66	3.4	70	186
		76	4.3	70	108
	ER4047	55	2.5	70	185
		66	3.4	70	175
		76	4.3	70	130
1.5mm 厚Aleris Superlite 200 ST铝合金板 /1.2mm厚镀 锌钢	ER5356	66	4.3	70	157
		76	5.3	70	-
	ER4043	66	3.4	70	135
		75	4.2	70	148
		85	5.1	70	130
	ER4047	66	3.4	70	137
		75	4.2	70	122
		85	5.1	70	109
	ER5356	75	5.2	70	-
		85	6.2	70	77