



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（下）

□ 中国第一汽车集团股份有限公司 / 郭鑫

对于1mm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1mm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搭接接头拉伸强度较高，断裂位置主要为焊

缝（断裂曲线，见图18）。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 FeAl_3 和 Fe_2Al_3 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。

完成1mm厚Novelist AC 170 PX 铝合金板/1mm厚ST13钢板、1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板/1mm厚ST13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，所得拉伸曲线分别如图19和图20所示，拉伸断裂照片如图21和图22所示，焊接工艺参数及对应的拉伸试验结果见表6。

对于1mm厚Novelist AC 170 PX 铝合金板/1mm厚ST13钢板MIG搭接焊接，采用ER4047实芯焊丝获得的接头抗拉强度最高为107MPa，达到铝合金母材强度的50%。

对于1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST 铝合金板/1.0mm厚ST13钢板MIG搭接焊接，采用ER4047实芯焊丝获得的接头抗拉强度最高为70MPa，达到铝合金母材强度的35%。

1mm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钢板异质材料MIG搭接焊接接头拉伸试验时的延伸率较低，主要是因为铝合金和钢润湿性不好，且在高温时容易结合生成 $FeAl_3$ 和 Fe_2Al_5 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。

(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23和图24。

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

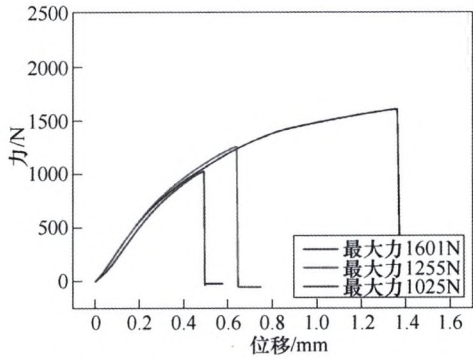


图18 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊拉伸断裂曲线
Novelist AC 170 PX铝合金/ST16钢板MIG焊接
焊接参数：1.2mm ER4047药芯焊丝，焊接电流66A，
焊接速度70cm/min，送丝速度3.4m/min
铝合金母材强度213MPa，接头平均强度107MPa，达到母材强度50%

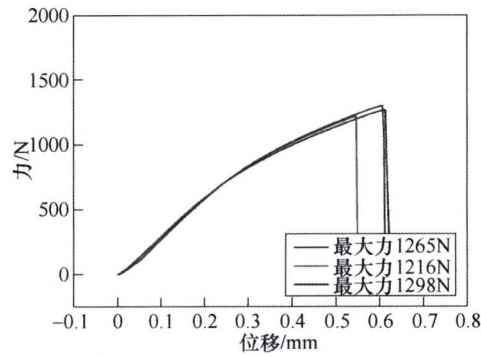


图19 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊拉伸断裂曲线
Aleris Superlite 200 ST铝合金/ST16钢板MIG焊对接
焊接参数：1.2mm ER4047实芯焊丝，焊接电流85A，
焊接速度70cm/min，送丝速度5.1m/min
铝合金母材强度202MPa，接头平均强度70MPa，达到母材强度35%

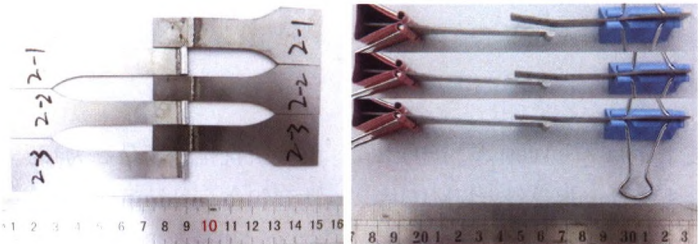


图20 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊接接头拉伸断裂照片
(焊接参数：4047实芯焊丝，焊接电流66A，焊速70cm/min，送丝速度3.4m/min)

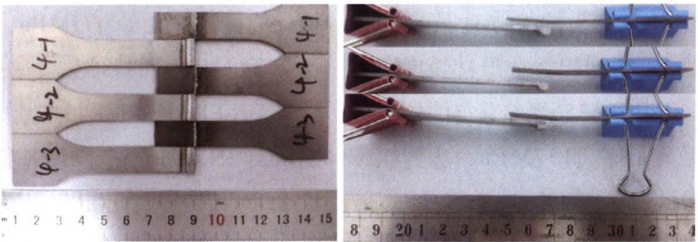


图21 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊接接头拉伸断裂照片
(焊接参数：4047实芯焊丝，焊接电流85A，焊速70cm/min，送丝速度5.1m/min)

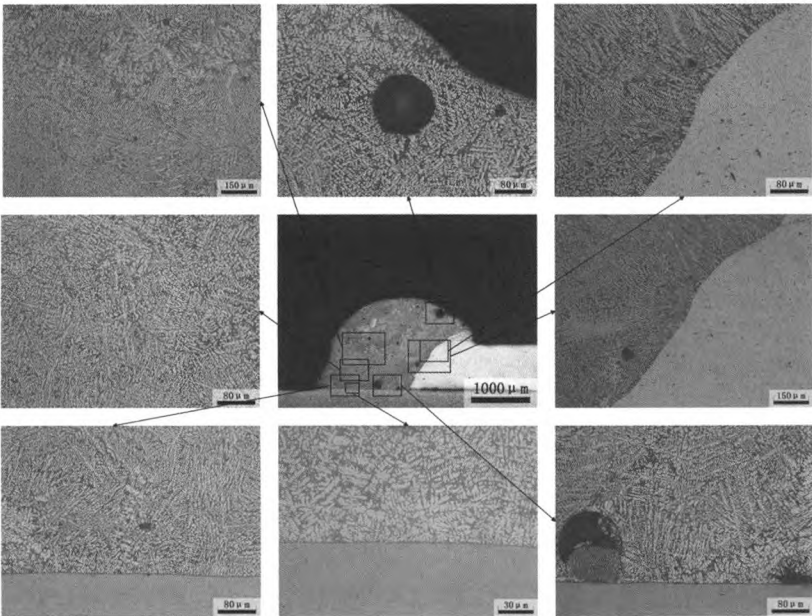


图22 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST06Z镀锌钢MIG搭接接头形貌
(焊接参数: ER4043焊丝, 焊接电流55A, 焊速70cm/min, 送丝速度2.5m/min)

表6 铝合金/ST13钢板MIG搭接接头拉伸测试结果

母材	焊丝牌号	焊接电流/ A	送丝速度/ m·min ⁻¹	焊接速度/ m·min ⁻¹	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

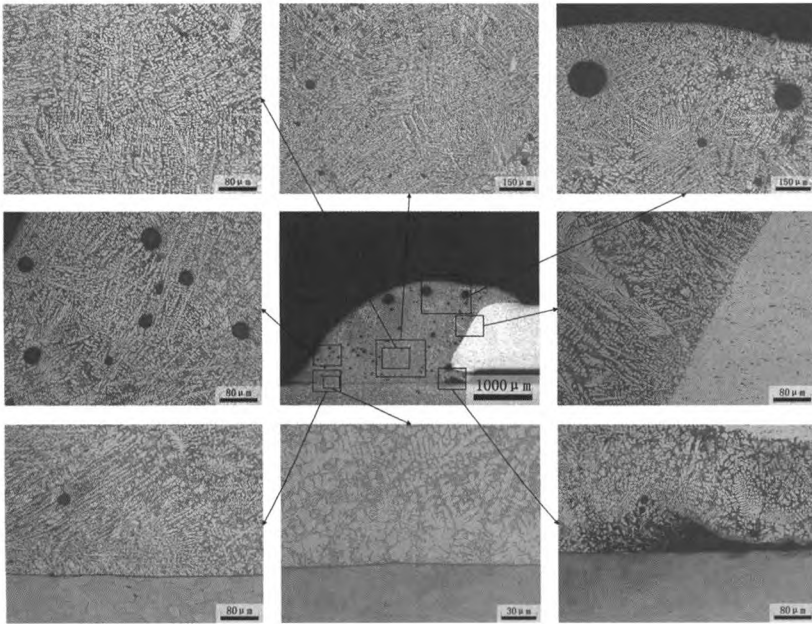


图23 Aleris Superlite200 ST铝合金板/ST06Z镀锌钢MIG搭接接头形貌
(焊接参数: ER4043焊丝, 焊接电流66A, 焊速70cm/min, 送丝速度3.4m/min)

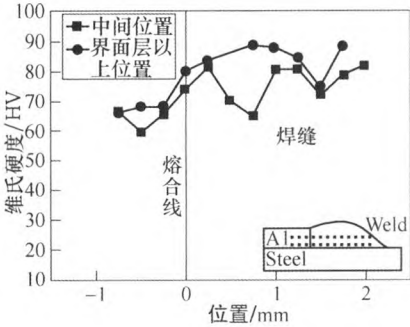


图24 不同焊接参数下接头中的显微硬度分布

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。

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。

(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25所示。

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

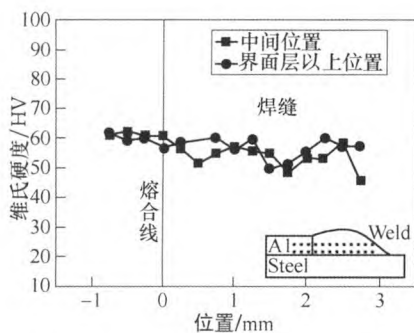


图25 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊接头显微硬度分布 (4047实芯焊丝, 焊接电流66A, 焊速70cm/min, 送丝速度3.4m/min, 抗拉强度107MPa, 断于界面层)

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。

Novelist AC 170 PX铝合金/ST06Z镀锌钢MIG搭接焊接头, ER4043焊丝, 焊接电流55A, 速度70cm/min, 送丝速度2.5m/min, 抗拉强度189MPa, 断于热影响区。

Aleris Superlite 200 ST铝合金/ST06Z镀锌钢MIG搭接焊接头, 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26和图27所示。

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

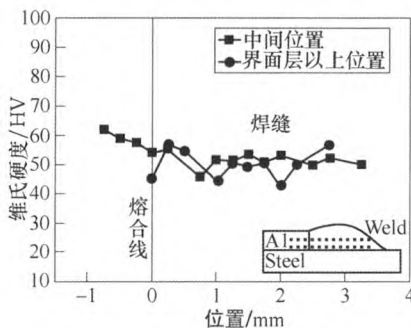


图26 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST13钢板MIG搭接焊接头典型部位显微组织 (4047实芯焊丝, 焊接电流85A, 焊速70cm/min, 送丝速度5.1m/min, 抗拉强度70MPa, 断于界面层)

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。

(5) 断口形貌。铝合金/镀锌钢板MIG搭接焊接头拉伸断口形貌如图28~图31所示。

对于1mm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

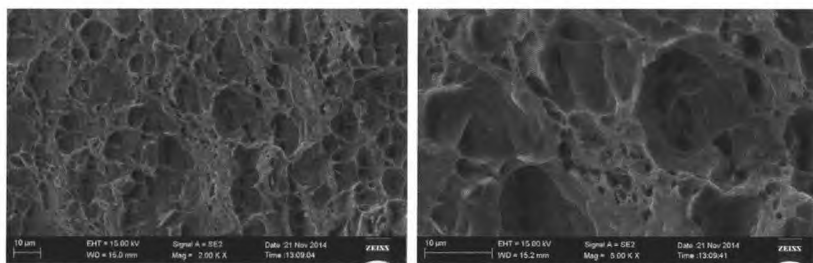


图27 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST06Z镀锌钢板MIG搭接焊接头拉伸断口形貌 (ER4043焊丝, 焊接电流55A, 焊接速度70cm/min, 送丝速度2.5m/min)

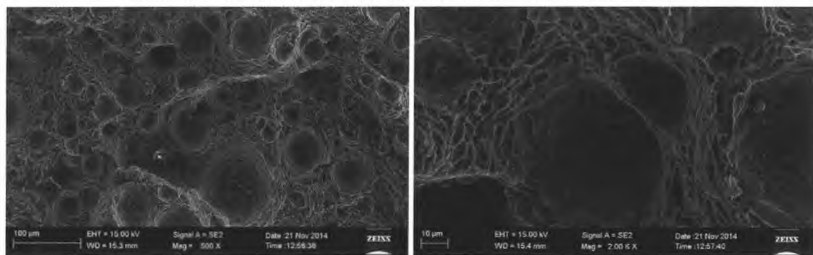


图28 Novelist AC 170 PX铝合金板/ST06Z镀锌钢板MIG搭接焊接头拉伸断口形貌 (ER4047焊丝, 焊接电流55A, 焊接速度70cm/min, 送丝速度2.5m/min)

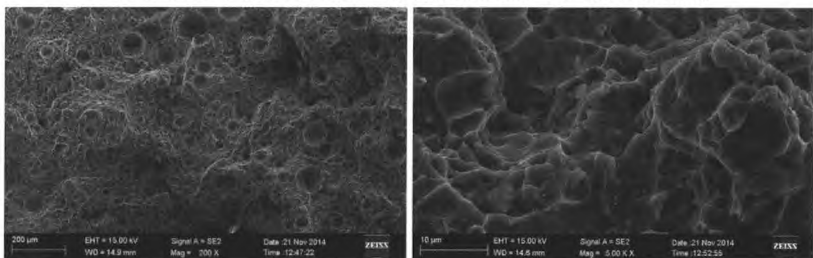


图29 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST06Z镀锌钢板MIG搭接焊接头拉伸断口形貌 (ER4043焊丝, 焊接电流66A, 焊接速度70cm/min, 送丝速度3.4m/min)

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处，以韧性断裂为主。

(6) 疲劳性能。对铝合金/镀锌钢MIG搭接焊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 $F_{max}(1mm)=2.66kN$ ， $F_{max}(1.5mm)=3.78kN$ （均为铝合金母材抗拉强度的50%），试验谷值 $F_{min}(1mm)=0.266kN$ ， $F_{min}(1.5mm)=0.378kN$ ，设定循环次数为20 000次，试验前用200号砂纸仔细打磨试样边缘和试样表面，所得疲劳试验数据见表7，疲劳测试后的试样照片如图32所示。从第一组疲劳测试结果可以看出，Novelist AC 170 PX铝合金板/ST06Z镀锌钢板和Aleris Superlite 200 ST铝合金/ST06Z镀锌钢板MIG搭接焊接头的疲劳强度非常低，最高循环次数仅4 187次，且疲劳断裂均发生在焊缝处。

调整疲劳试验参数进行第二组试验，试验峰值 $F_{max}(1mm)=1.60kN$ ， $F_{max}(1.5mm)=2.27kN$ （均为铝合金母材抗拉强度的30%），试验谷值 $F_{min}(1mm)=0.160kN$ ， $F_{min}(1.5mm)=0.227kN$ ，应力比为0.1，设定循环次数为2 000 000次，试验结果见表8，疲劳测试后的试样照片如图33所示。第二组疲劳试验结果与第

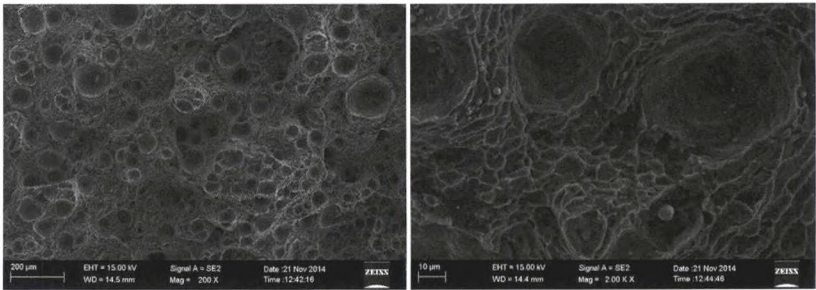


图30 Aleris Superlite 200 ST铝合金板/ST06Z镀锌钢板MIG搭接焊接头拉伸断口貌
(ER4047焊丝，焊接电流66A，焊接速度70cm/min，送丝速度3.4m/min)

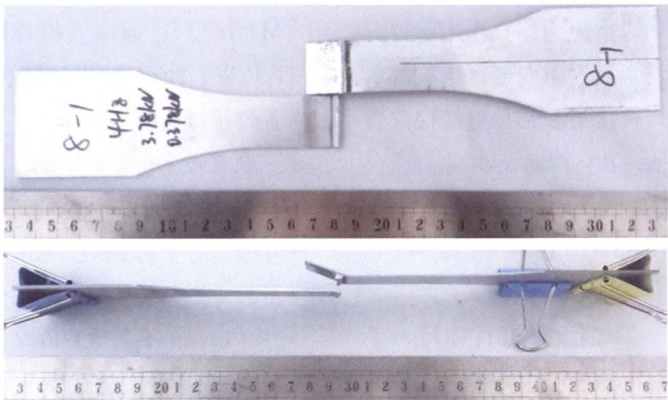


图31 第一组疲劳测试后试样照片

(Aleris Superlite 200 ST铝合金/ST06Z镀锌钢板MIG搭接焊，ER4047焊丝，焊接电流66A，焊接速度70cm/min，送丝速度3.4m/min，循环次数4 187次，断裂于焊缝)

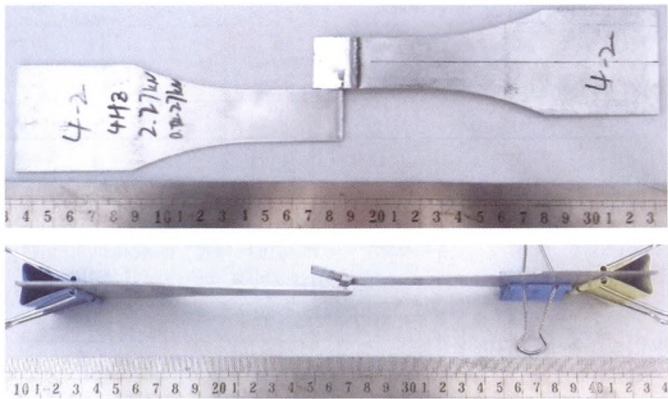


图32 第二组疲劳测试后试样照片

(Aleris Superlite 200 ST铝合金/ST06Z镀锌钢板MIG搭接焊，ER4043焊丝，焊接电流75A，焊接速度70cm/min，送丝速度4.2m/min，循环次数72766次，断裂于焊缝)

表7 铝合金/镀锌钢板MIG搭接焊接头第一组疲劳试验结果

母材	焊丝牌号	焊接电流 /A	送丝速度/ m·min ⁻¹	焊接速度/ m·min ⁻¹	载荷/N		应力/MPa		断裂 循环数	断裂 位置
					最大	最小	最大	最小		
Novelist AC 170 PX 铝合 金板/镀锌钢	4043	55	2.5	70	2 660	266	106.4	10.64	43	焊缝
	4047	55	2.5	70	2 660	266	106.4	10.64	49	焊缝
Aleris Superlite 200 ST 铝合 金板/镀锌钢	4043	75	4.2	70	3 780	378	100.8	10.08	76	焊缝
	4047	66	3.4	70	3 780	378	100.8	10.08	4187	焊缝

一组疲劳试验结果相似，最高循环次数也仅72 766次，断裂也全部发生在焊缝。

铝合金/镀锌钢板MIG搭接焊接头疲劳试验结果表明，无论在铝合金母材抗拉强度50%或30%应力水平下，接头的疲劳性能均较差，主要原因可能是由铝合金/钢异质金属焊接接头中存在的金属间化合物、微缺陷和残余应力综合作用所致，且接头受力后发生变形，钢板发生翘曲，焊接接头和铝母材连接位置发生弯曲，易在弯曲处断裂。

铝/钢组合板材样片不同焊接试验结论

对于铝/钢组合板材样片，主要包括1mm厚Novelist AC 170 PX

铝合金板/1.2mm厚ST06 Z镀锌钢板、1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST铝合金板/1.2mm厚ST06 Z镀锌钢板、1mm厚Novelist AC 170 PX铝合金板/1mm厚ST13钢板、1.5mm厚Aleris Superlite 200 ST铝合金板/1.0mm厚ST13钢板搭接组合，分别进行了全自动钨极氩弧焊（TIG焊）、全自动熔化极气体保护焊（MIG焊）、回填式搅拌摩擦焊（FSSW）和TOX铆接试验。焊后对各焊接接头的焊缝形貌、抗拉强度、剥离强度、金相组织、硬度分布、断口形貌和疲劳性能进行了测试分析。对于铝/钢组合板材样片焊接工艺试验得出以下结论：

（1）铝合金/ST06 Z镀锌钢板板材样片搭接焊测试结果（见表

9）。MIG焊接头的抗拉强度高 于TIG焊接头，最高达母材强度的89%。由于MIG焊的焊接速度为11.7mm/s，而TIG焊的焊接速度仅为2mm/s，MIG焊的工作效率远高于TIG焊。因此对于铝合金/ST06 Z镀锌钢板材样片搭接连续焊，推荐使用MIG焊工艺。对于点焊/连接，FSSW接头的抗拉强度高于TOX铆接接头，而TOX接头的剥离（正拉）强度更高。对于铝合金/ST06 Z镀锌钢板材样片搭接点焊，推荐采用FSSW或TOX铆接工艺。

（2）铝合金/ST13钢板材样片搭接焊测试结果（见表10）。TIG焊所用焊丝为4047药芯焊丝，MIG焊所用焊丝为4047实芯焊丝，两种接头的抗拉强度均比较低。对于

表8 铝合金/镀锌钢板MIG搭接焊接头第二组疲劳试验结果

母材	焊丝牌号	焊接电流 /A	送丝速度/ m·min ⁻¹	焊接速度/ m·min ⁻¹	载荷/N		应力/MPa		断裂循环数	断裂位置
					最大	最小	最大	最小		
Novelist AC 170 PX 铝合金板/镀锌钢	4043	55	2.5	70	1 600	160	64	6.4	17 420	焊缝
	4047	55	2.5	70	1 600	160	64	6.4	14 305	焊缝
Aleris Superlite 200 ST 铝合金板/镀锌钢	4043	75	4.2	70	2 270	227	60.5	6.05	72 766	焊缝
	4047	66	3.4	70	2 270	227	60.5	6.05	21 703	焊缝

表 9

母材	焊丝	TIG焊最高抗拉强度 /MPa	MIG焊最高抗拉强度 /MPa	FSSW		TOX铆接		备注
				抗拉/N	剥离/ N	抗拉 /N	剥离 /N	
1.0mm厚铝板/1.2mm厚ST06 Z 镀锌钢板搭接	ER4047	169	185	3044	301	1000	600	母材强度 213MPa
	ER4043	128	189					
	ER5356	151	157					
1.5mm厚铝板/1.2mm厚ST06 Z 镀锌钢板搭接	ER4047	119	137	4500	359	1600	1280	母材强度 202MPa
	ER4043	113	148					
	ER5356	141	77					

表 10

母材	TIG焊最高抗拉强度 /MPa	MIG焊最高抗拉强度 /MPa	FSSW		TOX铆接		备注
			抗拉 /N	剥离 /N	抗拉 /N	剥离 /N	
1.0mm厚铝板/1.0mm厚ST13钢板搭接	169	107	2495	450	1376	944	母材强度213MPa
1.5mm厚铝板/1.0mm厚ST13钢板搭接	171	70	3745	881	1720	1088	母材强度202MPa

（下转第60页）

焊则兼容两者优点。激光复合焊 (LaserHybrid) 主要指激光与MIG电弧复合焊接。激光和电弧相互作用、取长补短,激光复合焊技术并不是两种焊接方法依次作用,而是两种焊接方法同时作用于焊接区。

激光复合焊的优点:

(1) 降低对工件坡口加工装配和焊缝对中的精度要求, 间隙的搭桥能力很强。

(2) 高效率, 焊接速度最快可达9m/min。相比于MIG焊, 低的热输入可以减小零件变形。

(3) 获得更大的熔深, 从而用较小的激光功率就可以实现厚板的焊接。

(4) 显著增强反射率高的铝及铝合金材料对激光的吸收, 因此能够明显改善这些材料的激光焊接性。

激光复合焊一般应用于高端豪

华车型的铝合金零件中, 以德国大众旗舰车型辉腾 (Phaeton) 的铝制车门为例, 车门的焊缝总长4 980mm, 其中包括48条激光MIG复合焊缝 (总长3 570mm)。激光复合焊同样用于新型奥迪A8汽车的生产。在其侧顶梁上有各种规格和形式的接头采用MIG-激光复合焊工艺, 焊缝共计4.5 m长。

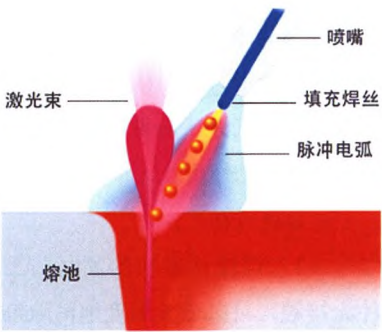


图12 激光复合焊

结语

目前, 能源、环境、安全等已经对汽车轻量化提出了迫切需求, 而铝合金材料由于优良的性能, 已经成为使用最广的轻量化材料。由于铝合金和传统钢材在物理属性等方面存在巨大差异, 传统的点焊技术已不是最佳的连接工艺。目前, 在铝合金常见的连接方式主要包括: SPR (自冲铆接)、Clinchen (无铆钉铆接)、EJOWELD (摩擦塞铆焊)、FDS (热融旋转攻丝铆接); 主要的焊接工艺包括: 铝电阻点焊、CMT (冷金属过渡焊接)、激光焊接。各种焊接与连接工艺都有一定的优势和局限性, 需要综合考虑实际的应用场合、经济性等方面选择最佳的工艺。未来, 随着轻量化材料、轻量化设计的不断发展, 必将会有新的焊接与连接工艺的不断创新发展。

AUTO1950

(上接第54页)

铝合金/ST13钢板材料样片搭接连续焊, 推荐采用药芯焊丝熔钎焊工艺。对于点焊/连接, FSSW接头的抗拉强度高于TOX铆接接头, 而TOX接头的剥离 (正拉) 强度要高一些。对于铝合金/ST13钢板材料样片搭接焊, 推荐采用FSSW或TOX铆接工艺。

(3) 铝/钢组合板材样片搭接接头的疲劳强度比较低。总体来讲, TIG焊和MIG焊接头的疲劳强度高于FSSW接头和TOX铆接接头, 而FSSW接头的疲劳强度与TOX铆接接头相当, 甚至略高。

由于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就更加需要我们做出大量的试验进行验证。通过本项目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, 在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; 然而, 异种材料连接技术也在逐年进步, 作为我们汽车人也会通过自身的学习与积累, 掌握、运用好相

关技术, 为自主汽车事业贡献自己的力量。 AUTO1950

郭鑫, 中国第一汽车集团股份有限公司发展制造部、主任、工程师。

