

城轨车辆铝合金空调板激光MIG复合焊工艺研究

吴志明　王雪芳　彭章祝

一、概述

铝合金型材焊接最初多采用MIG自动焊焊接，但由于MIG焊热输入高，焊接变形大，焊接产品的一致性难以控制，所以目前重视研究采用搅拌摩擦焊以及激光MIG复合焊等热输入小的新型焊接工艺，用于薄壁铝型材的焊接。

激光MIG复合焊作为一种高能束焊接方法，其光束功率密度高、热输入小、深宽比大、热传导快、焊接速度快，能很好的实现高效自动化，又具有焊接变形小的优点，因此铝合金型材激光MIG复合焊的前期工艺研究对今后该新工艺的工程化应用具有较高的研究价值。

二、空调板产品结构及激光MIG复合焊工艺试验

1. 空调板产品结构

空调板由5块中空薄壁挤压铝型材组成，型材整体厚度15mm，结构如图1所示。型材材质EN AW 6005A—T6，型材上下层板厚为2.5mm，焊接接头处厚度为3mm，为无坡口对接接头。

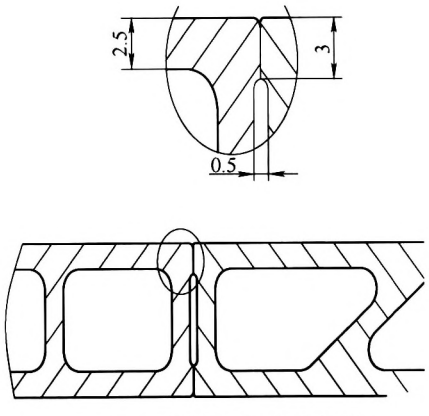


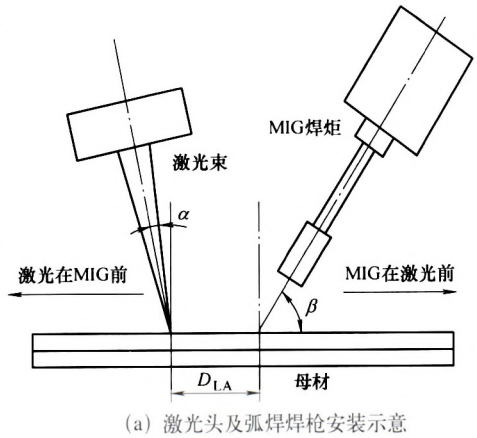
图1　空调板型材的焊接接头

2. 铝合金板材激光MIG复合焊工艺试验

（1）试验条件　焊接工艺试验采用IPG公司YRL—4000光纤激光器，MIG弧焊电源采用Fronius TPS4000逆变电源，采用ABB IRB4400/60焊接机器人。焊接过程中激光头和焊枪采用旁轴的安装方式，如图2所示。

先采用3mm铝合金板材进行对接接头激光MIG复合焊工艺试验，以初步筛选出合适的工艺参数，并同时发现该焊接工艺中易出现的问题。焊接母材为6005A—T6，铝合金焊丝采用ϕ1.2mm的ER 5087。

铝合金的激光MIG复合焊对装配间隙要求较高，为此测试铝合金对接试板在间隙<0.1mm、0.2mm、0.3mm、0.5mm，错边量<0.2mm情况下，通过改变激光功率、焊接



（a）激光头及弧焊焊枪安装示意



（b）激光头及弧焊焊枪安装效果

图　2

速度、电流大小和离焦量等参数，获得不同装配间隙下合格的焊接接头。

铝合金导热率大，焊接时非常容易出现整条焊缝焊接熔深不一致的情况，最初尝试通过多级功率的方法可以得到较好的焊缝成形，可以在焊透的情况下减少塌陷的产生，但该方法在实际生产中难以有效控制。最终采用恒功率方法，通过大量试验，确定不同间隙下，3mm铝合金试板对接激光复合焊接参数如表1所示。

（2）试验结果　焊接试验发现，由于液态铝合金的表面张力较小，故当间隙较大时焊缝易出现下塌现象，可以通过改变离焦量来获得不同装配间隙时较好的焊缝成形。同时，在焊接过程中离焦量的调节相对其余参数调节更为方便，对自动化焊接影响不大。

当存在错边时，根据错边的大小将光斑向上板偏离。错边约0.5mm时，光斑应偏离约1/3；错边约1.0mm时，光斑应偏离约3/4。对焊接试件进行拉伸试验，其试验结果如表2所示。焊接接头强度为母材抗拉强度的70%~78%。

焊接接头的宏观金相如图3所示，接头上宽下窄，上部呈现一定的弧焊特征，下部更接近于激光深熔焊。由于激光焊接冷却速度快，所以熔池内部几乎同时冷却，焊缝中心区组织为等轴晶（等轴树枝晶）和沿不同方向的细小的柱状晶混合组成。由图4和图5可以看出，焊缝下部区域等轴晶和柱状晶晶粒非常细小，分布均匀；焊缝上部的晶粒比下部晶粒粗大。这是由于上部熔池较下部大，能量密度也较低，冷却时间相对较长，晶粒生长时间较长导致电弧区晶粒较大。

在熔合区（见图6），由于结晶方向总是与温度梯度最大的方向一致，铝合金激光复合焊焊接速度快，激光与金属作用时间短，热输入量小并且铝合金的导热速度快，因而导致垂直于熔合线的方向温度梯度极大，晶粒在其他方向的生长几乎完全一致，形成了垂直于熔合线致密的平行柱状晶。同时由于激光焊接热输入量小和铝合金高的导热速度，焊缝附近母材处于高温的时间很短，导致热影响区很小。

3. 空调板型材激光MIG复合焊工艺试验

采用1m长的空调板型材进行

表1　不同装配间隙下3mm铝合金试板激光复合焊接参数

序号	装配间隙 /mm	激光功率 /kW	焊接速度 /m·min^{-1}	焊接电流 /A	离焦量 /mm	氩气流量 /m^3·h^{-1}	激光偏角 (°)	焊枪偏角 (°)
1	<0.1	3.2	4	160	-1	1.5	10	60
2	0.2	3.2	4	160	0	1.5	10	60
3	0.3	3.2	4	160	2	1.5	10	60
4	0.5	3.2	4	160	3	1.5	10	60

表2　不同装配间隙合焊接接头力学性能

序号	间隙/mm	σ /MPa	断裂位置	接头与母材抗拉强度比(%)
1	≤0.1	220.3	近焊缝区	78
2	约0.2	196.9	近焊缝区	70
3	约0.3	197.5	近焊缝区	70
4	约0.5	204	近焊缝区	72

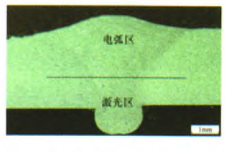
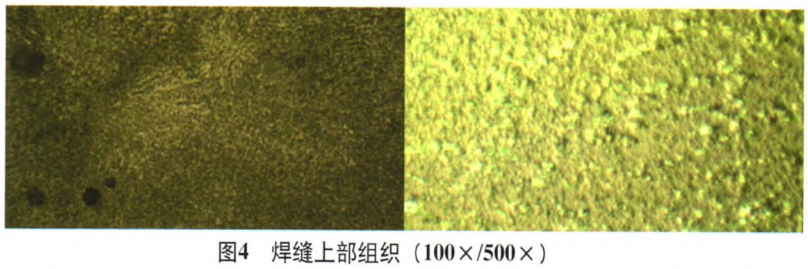
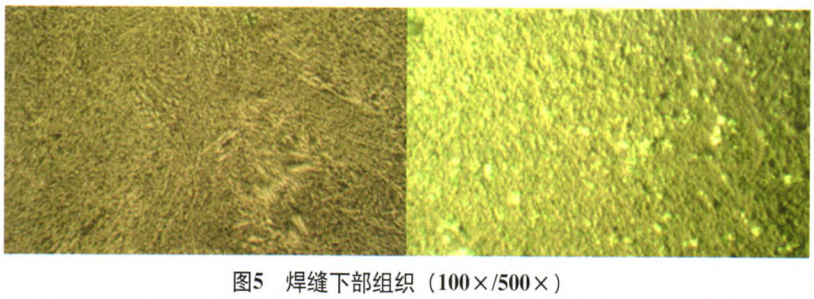
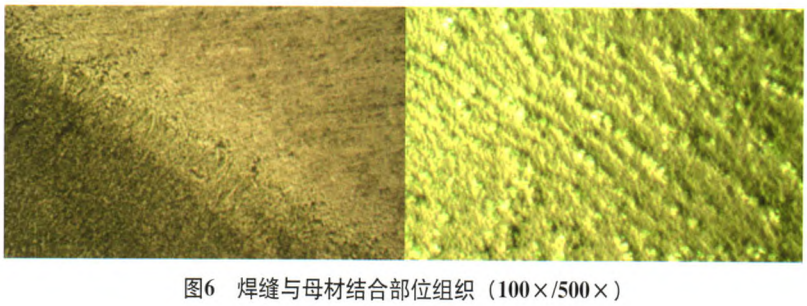


图3　焊缝宏观形貌（10×）


图4　焊缝上部组织（100×/500×）


图5　焊缝下部组织（100×/500×）


图6　焊缝与母材结合部位组织（100×/500×）

试验，结合3mm铝合金板材工艺试验得到的优化工艺参数并考虑到型材较强的散热能力，选用表3焊接参数进行焊接。

焊后取样发现，当热输入不足时，易在焊缝根部出现未焊透， 图7为不同热输入量焊缝横截面情况。由于铝合金热导率很大，型材散热速度也远大于板材，因此采用板材焊接参数焊接型材时容易出现未熔透，如图7a所示。焊接型材时可以采用较大热输入量的工艺来保证焊缝的熔透，如图7b所示。

型材的激光MIG复合焊焊缝内部易产生两类气孔缺陷：一类是激光焊接在冷却过程中氢的溶解度急剧下降形成的溶氢气孔（见图8），该类气孔体积较小，呈规则球形；另一类是激光焊接时匙孔闭合塌陷以及工艺不稳定因素所致的工艺气孔（见图9）。

氢气孔可以通过焊接前对焊接试件打磨充分，很大程度上限制了氢的来源，因此在所得焊缝内部几乎没有或只有少量尺寸很小的氢气孔。

工艺气孔主要存在于焊缝中下部，其形成与焊接过程的小孔塌陷密切相关，小孔越稳定，气孔越不易形成。相关研究表明：小孔曲率半径越大，稳定性越高，气孔不易形成，如图10所示。因此，增大焊接小孔直径有利于提高小孔稳定性，减少工艺气孔的产生。

而控制工艺气孔的产生，应该从控制工艺气泡的产生和促进气泡的逸出着手。控制工艺气泡的产生主要是增大小孔直径（采用离焦的方式），维持小孔稳定性；促进气泡的逸出主要是通过改善气孔的溢出通道和增加气泡逸出时间。

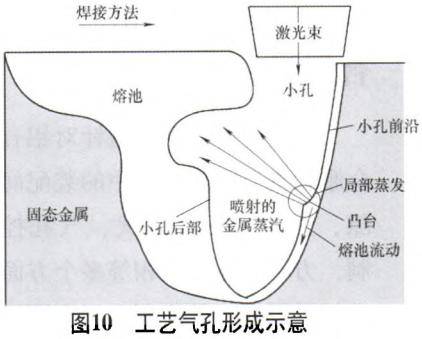


图10　工艺气孔形成示意

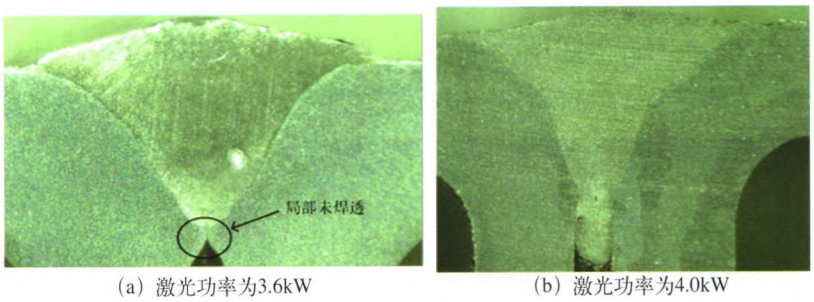
根据以上情况，采用不同焊接参数测试气孔率，焊接参数如表4所示。

通过试验可知，随着焊接速度的降低，焊缝内部气孔含量有所降低。在保证焊透的情况下，采用低速和离焦的方式虽然不能完全消除焊缝内部的气孔，但是可以将气孔数量和气孔率控制在较低的范围。

通过采用负离焦，增大热输入量增大熔深，最终确定的型材板焊接参数如表5所示。焊后对型材接头进行3组试样的拉伸试验，测得其平均抗拉强度可达211MPa，试验结果合格。

表3　空调板型材焊接参数

参数编号	激光功率/kW	焊接速度/m·min^{-1}	离焦量/mm	脉冲电流/A	干伸长/mm	偏角（°）		光丝间距/mm	保护气流量/L·min^{-1}
						激光	焊枪		
1	3.6	3.6	-1	140	17	11	60	3	17
2	4	3.6	-1	140	17	11	60	3	17



（a）激光功率为3.6kW　　（b）激光功率为4.0kW

图7　不同激光功率下焊缝横断面宏观金相组织

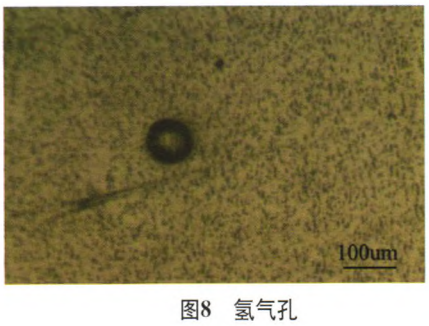


图8　氢气孔

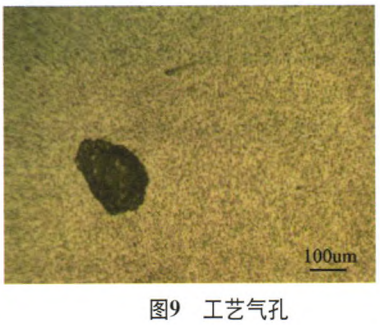


图9　工艺气孔

表4　不同焊接参数下的焊缝气孔率

序号	激光功率/kW	脉冲电流/A	离焦量/mm	焊接速度/m·min^{-1}	气孔率（%）
1	4	120	0	3	2.66
2	4	120	2	2.7	1.36
3	4	120	2	2.4	0.95
4	4	120	2	2	0.5

表5　型材焊接参数

序号	激光功率/kW	焊接速度/m·min^{-1}	脉冲电流/A	离焦量/mm	保护气体/m^3·h^{-1}	激光偏角（°）	焊枪偏角（°）
1	4.0	3.0	100	-5	1.5	10	60

三、采用激光MIG复合焊进行空调板制造

通过前期主要试验针对铝合金激光复合焊接过程中的装配间隙、错边、参数调试、气孔控制、力学性能及金相等多个方面进行了研究，最终制定了空调板产品的激光复合焊工艺。采用优化后的工艺参数，顺利实现空调板产品的激光复合焊制造。焊接后的空调板产品焊缝美观，焊接变形小，整个空调板平面度＜2mm。空调板产品焊接过程如图11所示。

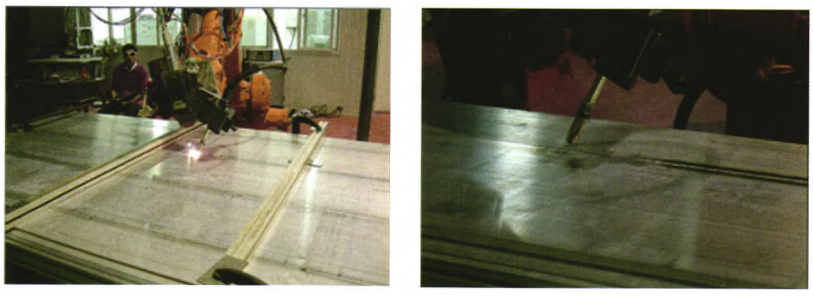


图11　铝合金空调板激光MIG复合焊焊接过程

同时，为批量化焊接产品，我们还对工装夹具进行了优化，图12为改进后的夹具。该套夹具具有装夹方便，装配间隙、错边等容易控制等优点。

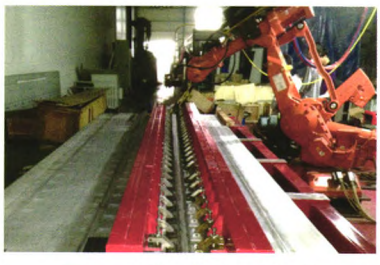


图12　改进设计的工装夹具

四、结语

通过从板材、小件型材的焊接试验，到最后空调板产品的实际焊接，最终证明激光MIG复合焊这种新工艺完全适合于铝型材的焊接，并体现出焊接效率高，产品焊接接头质量好，产品变形小等优势。激光MIG复合焊为薄壁铝型材产品的制造提供了一种新的工艺方案。

作者简介：吴志明等，南车株洲电力机车有限公司工程师，其中吴志明为城轨事业部副总经理，主要从事城轨车辆制造工艺工作。

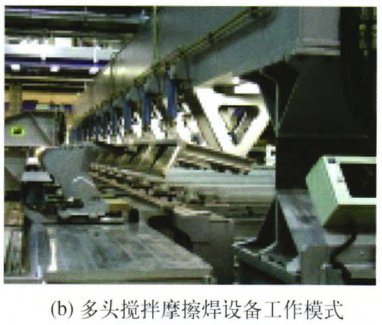
MW 20140706

（上接第26页）

IGMH和HAGE及北京赛福斯特技术有限公司等对搅拌摩擦焊大型设备均有较明显的制造业绩。图3为典型的搅拌摩擦焊自动焊设备工作模式。



(a) 单头搅拌摩擦焊设备工作模式



(b) 多头搅拌摩擦焊设备工作模式



(c) 6轴搅拌摩擦焊设备工作模式

图3　搅拌摩擦焊自动焊设备工作模式

4. 建议

针对轨道车辆企业提质提能生产的大环境，机械手MIG焊焊接已经广泛应用在铝合金车体长大部件的生产制造中，而采用高质、高效、节能及环保的搅拌摩擦焊工艺制造铝合金车体已成为国内外发展趋势，相应的关键技术研究也引起广泛关注。但是搅拌摩擦焊的在工业应用时间尚短，理论研究尚不成熟。因此，针对搅拌摩擦焊机械手设备的研发、焊接结构设计和制造工艺的持续优化等几方面的深入研究，将有利于搅拌摩擦焊机械手在铝合金车体制造业中的进一步推广应用。

作者简介：刘庆祝等，长春轨道客车股份有限公司工程师，其中刘庆祝为公司工业化部高级工程师，主管轨道车辆制造总体工艺技术；车体焊接专业规划布局和新技术开发等工作。

MW 20140706