



激光-MIG复合焊与其他焊接方法性能对比分析

火巧英 陶富文

【摘要】 本文主要针对铝合金激光-MIG复合焊与其他焊接方法进行对比研究，为激光-MIG复合焊接技术在国内高速列车铝合金焊接领域的应用提供技术储备和数据支持。试验对4mm厚6005A铝合金试板的激光焊接、MIG焊接、激光-MIG复合焊接和MIG-激光复合焊接这四种焊接方法的保护情况、外观成形、无损探伤、接头组织及力学性能等方面进行了对比分析。

关键词： 焊接方法；激光-MIG复合焊接；性能分析

1. 概述

铝合金激光-MIG复合焊与其他焊接方法进行对比研究，为激光-MIG复合焊接技术在国内高速列车铝合金焊接领域的应用提供技术储备和数据支持。试验对4mm厚6005A铝合金试板的激光焊接、MIG焊接、激光-MIG复合焊接和MIG-激光复合焊接这四种焊接方法的保护情况、外观成形、接头组织及力学性能等方面进行了对比分析。完成了四种焊接方法形貌对比，并对拉伸性能、弯曲性能及硬度分布进行分析，激光-MIG复合

焊接接头的各项指标良好，与其他三种焊接方法相比有一定优势，综合力学性能最佳。

2. 焊接参数选择

通过大量前期试验确定四种焊接方法的工艺参数，具体如表1所示。MIG焊接试板开60°坡

口，其他三种焊接方法开0°坡口。焊前对坡口打磨清洗，焊接时试板之间不留间隙。

MIG焊接的速度明显低于其他三种焊接方法的速度，这是因为MIG焊接熔深小，为保证焊透，试板开60°坡口，与开0°

表1 四种焊接方法工艺参数

焊接方法	激光功率/kW	送丝速度/m·min ⁻¹	激光器与焊接方向夹角(°)	焊枪与焊接方夹角(°)	焊接速度/m·min ⁻¹	离焦量/mm	光丝间距/mm
MIG焊	—	11.0	—	75	0.6	—	—
激光焊	3.0	—	105	—	1.2	0	—
激光-MIG	2.1	8.0	105	47.2	1.2	0	3
MIG-激光	2.2	8.0	120	61.2	1.2	0	3

试。经过理论研究和实际生产验证得知，新的拼装工艺达到了以下效果。

(1) 相比传统工艺，新的工艺使机器人焊接可达率显著提升（如掩护梁提升约13%），同时减少了人工补焊量，降低了工人的劳动强度。

(2) 相比传统工艺，新的工艺使结构件焊接效率显著提升（如掩护梁提升约9.5%），缩短了产品制造周期，效益显著。

(3) 新的工艺在一定程度上减少了焊接变形和焊后矫正工作量，在提升产品质量的同时，也降低了生产成本。

作者简介：赵旭等，郑州煤矿机械集团股份有限公司。项目：河南省重大科技专项：《高端综采液压支架智能制造焊接机器人的研究与应用》。项目编号：161100211300

MW 20170519

坡口的焊接方法相比MIG焊接需要填充更多的金属，这就决定了MIG焊接需降低焊接速度，并配合更大的送丝速度来保证足够的填充量；激光-MIG复合焊接与MIG-激光复合焊接的熔深大于MIG焊接，且激光热源对电弧有稳定作用，有利于提高焊接速度，所以此两种焊接方法的速度高于MIG焊接。

3. 焊缝正面形貌对比

丙酮擦洗后的焊缝外观形貌如图1所示，四种焊接方法焊缝正面相貌各有特点。MIG-激光复合焊接保护效果差是因为该焊接方法沿焊接方向MIG在前，激光在后，MIG焊枪的保护气对复合焊接熔池的保护有限。MIG焊接与激光-MIG复合焊接的焊缝正面相貌相似，焊缝成形良好，鱼鳞纹清晰连续，相比之下激光-MIG复合焊接的焊缝熔宽略窄、余高小，焊缝更平齐；与MIG焊接、激光-MIG复合焊接相比，MIG-激光复合焊接的焊缝狭窄且余高较大，焊缝正面成形不佳，没有鱼鳞纹；激光焊接无金属填充，其焊缝熔宽最窄，焊缝表面略有凹陷。

综合来说，激光-MIG复合焊接的成形最佳。

4. 焊缝形状对比

四种焊接方法的焊缝形状如图2所示，焊缝形状与焊缝正面成形特点相吻合。MIG焊接的熔宽、余高大，焊缝上下尺寸变化明显，熔合线呈现明显的弧形；激光焊接的熔宽小，焊缝上部存在凹坑，熔合线的弧形明显；激光-MIG复合焊接与MIG-激光复合焊接的焊缝上下尺寸变化均

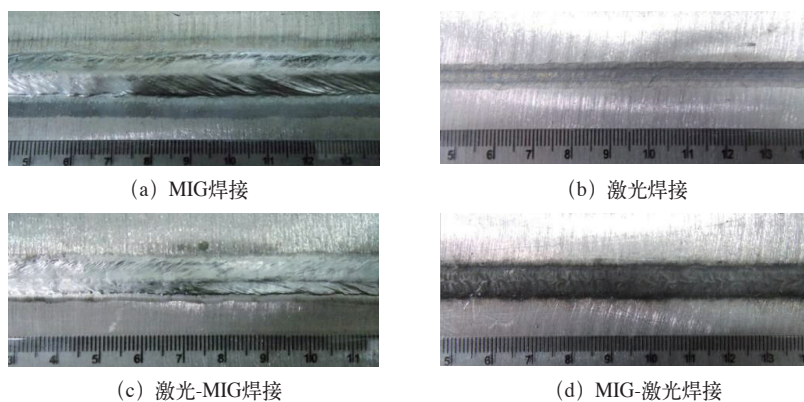


图1 焊缝正面成形对比

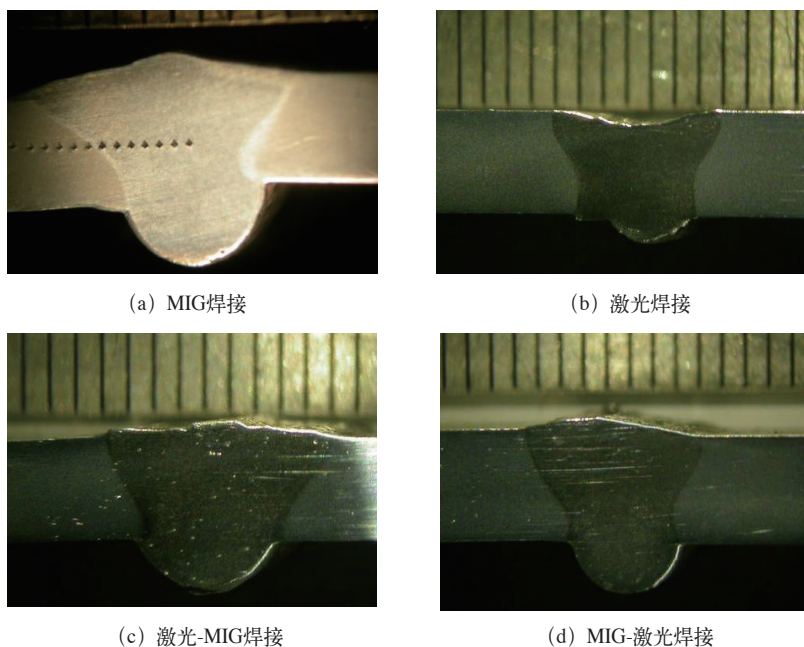


图2 焊缝形状对比

匀，激光-MIG复合焊接的熔合线较平直。焊缝是接头薄弱区域，熔宽过对接头承载不利；余高过大则容易产生应力集中；焊缝上下尺寸变化不均匀对焊缝的承载同样有不利影响。

综合来看，激光-MIG复合焊接的焊缝余高、熔宽较小，焊缝上下尺寸变化均匀，形状良好。

5. 金相组织对比

高速列车用6005A铝合金是热处理强化铝合金，母材是完全再结晶组织，化合物被破碎并沿

型材挤压方向成行排，主要强化相为 Mg_2Si 相。四种焊接方法的焊缝均为明显的枝晶组织，分布杂乱无序。激光-MIG复合焊接与MIG-激光复合焊接的焊缝组织相似，枝晶组织粗大；与激光-MIG复合焊接与MIG-激光复合焊接相比，MIG焊接的焊缝枝晶密度较小，枝晶组织更加粗大，一方面是因为MIG焊接的热输入量大，冷却速度小，有利于枝晶生长，另一方面是因为MIG焊接开 60° 坡口，与开 0° 坡口的激

光-MIG复合焊接及MIG-激光复合焊接相比，焊缝成分与焊丝更加接近，成分的差别必然导致组织的不同；激光焊接的焊缝组织与其他三种焊接方法的焊缝组织差别较大，枝晶细小且离散，一方面是因为激光焊接热输入小，冷却速度大，枝晶生长困难，另一方面是因为激光焊接无焊丝加入，其焊缝成分与母材接近，与其他焊接方法的焊缝成分有明显差别。

6. 力学性能对比

（1）接头拉伸性能对比 四种焊接方法的接头拉伸试验情况如表2所示，拉伸断口形貌如图3所示。MIG焊接的接头平均抗拉强度最大，高达197.97MPa；激光-MIG复合焊接与MIG-激光复合焊接的接头平均抗拉强度分别为192.92MPa与192.77MPa，略低于MIG焊接；激光焊接的接头平均抗拉强度为166.52MPa，明显低于其他三种焊接方法。

激光焊接的拉伸试样均断于焊缝处，断口气孔较多。由于气孔过多容易造成应力集中影响试样的承载能力，所以激光焊接的接头抗拉强度最低；激光-MIG复合焊接与MIG-激光复合焊接的拉伸试样均断于焊缝处，MIG-激光复合焊接的拉伸试样的断口存在少量气孔，激光-MIG复合焊接的拉伸试样的断口没有发现气孔；MIG焊接的拉伸试样均断于热影响区，断口塑性变形明显，断裂方式与其他三种焊接方法有明显处区别。6005A铝合金是热理强化铝合金，受焊接热过程影响显著，而

MIG焊接的热输入大，热影响区损伤严重，是接头力学性能的最薄弱区域，所以MIG焊接的拉伸试样均断于热影响区。

（2）接头弯曲性能对比 弯曲性能表征材料承受弯曲载荷的能力，生产上常用弯曲试验来评定材料的弯曲强度和塑性变形的大小。四种焊接方法的接头弯曲试验结果如表3所示。

综合弯曲试验数据及试样弯曲后宏观图片可知：四种焊接方法焊接接头弯曲性能均较好，弯曲角达到180°时试样均没出现开裂和裂纹。

（3）接头硬度对比 硬度是

材料抵抗弹性变形、塑性变形或破坏的能力，是金属材料力学性能的一个非常重要的指标。四种焊接方法接头硬度分布如图4所示。

四种焊接方法的接头硬度分布曲线形状相似，焊缝处硬度低，从熔合线到母材硬度呈现先降低后升高的变化趋势。焊缝处硬度低是因为焊缝为急冷铸态组织。6005A铝合金为热处理强化铝合金，对焊接热过程敏感，从熔合线至母材，热影响区分为固熔区、过时效区和近母材区，其中过时效区第二相Mg₂Si颗粒聚集长大，强化相数量减少，软化

表2 四种接头拉伸数据（5组试验）

焊接方法	抗拉强度/MPa	平均抗拉强度/MPa
激光-MIG	197, 194, 199, 190.5, 184.1	192.92
MIG-激光	198, 197, 194, 189.35, 185.5	192.77
激光	159, 168, 158, 175.79, 171.81	166.52
MIG	197.57, 205.4, 200.98, 182.56, 203.37	197.97

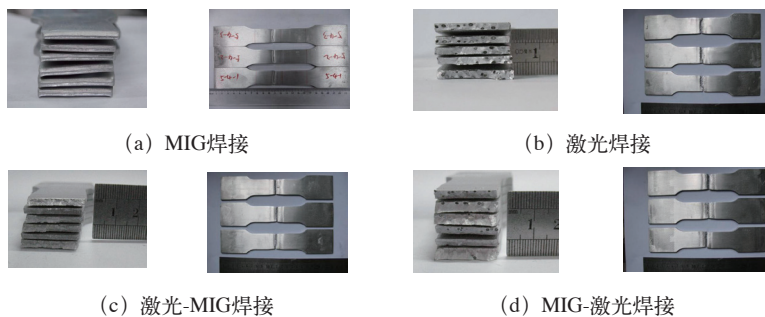


图3 拉伸试样断口形貌

表3 四种焊接接头弯曲试验数据（2组试验）

坡口角度	试验形式	厚度/mm	弯曲直径/mm	弯曲角（°）	试验结果
MIG焊	面弯	4	50	180	完好
	背弯	4			完好
激光焊	面弯	4	50	180	完好
	背弯	4			完好
激光-MIG	面弯	4	50	180	完好
	背弯	4			完好
MIG-激光	面弯	4	50	180	完好
	背弯	4			完好

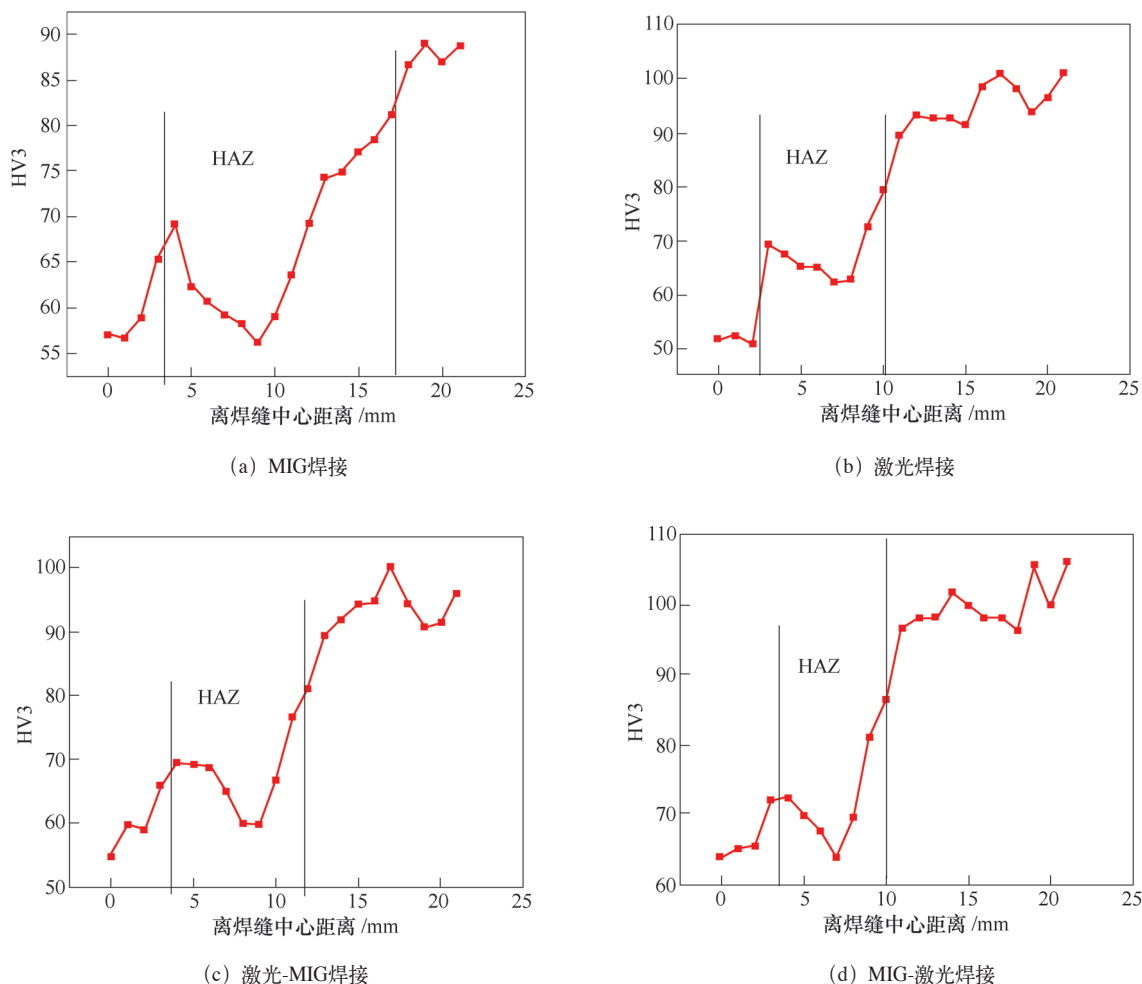


图4 接头硬度分布

严重，是热影响区硬度最低的部位。综合来看，焊缝和过时效区是接头硬度薄弱的区域。

对比来看，MIG焊接热影响区宽13mm，接头最低硬度56HV；激光焊接热影响区宽7mm，接头最低硬度50HV；激光-MIG复合焊接热影响区宽8mm，接头最低硬度55HV；MIG-激光复合焊接热影响区宽7mm，接头最低硬度63HV。MIG-激光焊接与激光-MIG焊接的接头硬度分布情况良好。

7. 结语

(1) 从工艺参数来看，

MIG焊接的速度最慢，焊丝消耗量最大，生产效率与其他三种焊接方法相比有较大差距。

(2) 从焊缝正面形貌来看，激光-MIG复合焊接的焊缝鱼鳞纹清晰，熔宽较窄，余高较小，成形情况最佳。

(3) 从焊缝形状来看，激光-MIG复合焊接的焊缝上下尺寸变化均匀，形状良好，优于其他三种焊接方法。

(4) 从金相组织及力学性能来看，四种焊接方法接头组织的差别主要体现在焊缝处，激光焊接焊缝组织细小离散，组织状

况最好，激光-MIG复合焊接接头的各项指标良好，力学性能最佳。

(5) 四种焊接方法中，采用激光-MIG复合焊接的方法焊接4mm厚6005A铝合金效果最好。

作者简介：火巧英，南京中车浦镇城轨车辆有限公司；陶富文，南京浦镇城海泰制动设备有限公司。

MW 20170519