

第十三章 铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接技术

第一节 概述

激光-电弧复合热源焊接技术 (Laser-arc Hybrid Welding) 是 20 世纪 70 年代末由 Steen 最先提出并逐渐发展成熟起来的一种优质、高效的新型焊接技术。众所周知, 传统电弧焊具有设备投资成本低、熔池金属搭桥能力强、应用范围广、操作简单等优点, 但是弧焊的缺点也比较明显, 如焊接速度慢、效率低、焊后变形大、部分焊接工件的后续处理工作量大等。激光焊具有焊接速度高、焊后变形和残余应力小、深熔焊焊缝的深宽比大、焊接热影响区窄、加工过程易实现自动化、可实现对精密工件及复杂工件的精密焊接等优点。但是, 激光焊也存在着一些诸如对工件坡口装配要求高、高反射率材料 (如铝、铜等) 的能量损失大、不填充材料焊接某些高性能金属材料时易产生冷裂纹或热裂纹等缺点。传统电弧焊和激光焊的这些缺点都制约着这两种焊接方法的应用。激光-电弧复合热源焊接是将激光焊和电弧焊两种热源的能量通过一定方式共同作用于工件产生同一个焊接熔池, 并通过二者的相互作用来实现材料的优质高效焊接的一种新型焊接方法。激光-电弧复合热源焊接分别继承了单独激光焊和弧焊的优点, 而又相互弥补对方的缺点, 是一种极具应用前景的先进焊接工艺方法。激光-电弧复合热源焊接不是激光热源与电弧热源的简单叠加, 在焊接过程中两热源会产生一系列的相互作用, 获得高速稳定的焊接过程, 并获得“1+1>2”的协同效应及焊接效果。

激光-电弧复合热源焊接技术的优点主要体现在:

- (1) 焊缝熔深大, 焊接速度快, 焊接效率高;
- (2) 焊接过程电弧稳定, 即使是在高于常规弧焊数倍的焊接速度下以及很小的焊接电流 (甚至是十几安培的电流) 下, 仍具有稳定的电弧;
- (3) 与激光焊相比, 复合焊对接头间隙的适应性强;
- (4) 焊缝成形好, 焊缝深宽比大, 易于实现单面焊双面成形;
- (5) 热源能量集中, 焊接热输入低, 焊接变形小, 后续校形处理工作量小;
- (6) 接头冶金质量好, 在高性能金属材料的焊接中, 可有效地降低接头软化、改善接头冶金组织、提高接头的力学性能;
- (7) 易于实现自动化焊接, 焊接过程不容易受工件形状和尺寸的限制。

根据不同的分类标准可以将激光-电弧复合热源焊接进行不同的分类。根据激光-电弧复合热源焊接所使用的激光器的类别不同, 通常可将激光-电弧复合热源焊接分为气体激光-电弧复合和固体激光-电弧复合; 根据与激光复合的电弧的类别, 可将激光-电弧复合热源焊接分为激光-非熔化极电

弧复合（包括钨极氩弧和等离子弧）和激光-熔化极电弧复合；根据激光与电弧的空间位置分布，可将激光-电弧复合热源焊接分为同轴复合和旁轴复合。目前，国内外研究的激光-电弧复合热源焊接可归纳为三类：即百瓦级激光与电弧的复合、千瓦级激光与电弧复合、万瓦级激光与电弧复合，这三类各具特色：

（1）百瓦级激光-电弧复合热源焊接，主要是显现电弧的焊接特性，小功率激光能量（ $\leq 500W$ ）主要起稳定和压缩电弧以及提高电弧能量利用率的作用，多用于激光-非熔化极电弧复合，比较适合薄板焊接。

（2）万瓦级激光-电弧复合热源焊接，主要呈现激光焊接的特点，具有较大的深宽比，主要采用万瓦级的大功率 CO_2 激光器或固体激光器与熔化极电弧复合，但是由于设备投资较大，暂难以大范围普及推广应用。

（3）千瓦级激光-电弧复合热源焊接，兼有激光和电弧的特性，能够充分发挥二者的优点，多用于激光-熔化极电弧复合，适用于铝合金、镁合金、钛合金、镍基合金、碳钢、不锈钢、低合金高强度钢、超高强度钢等材料的中薄板与厚板的焊接。千瓦级激光-电弧复合热源焊接设备的投资较适中，对不同产品的适应性好，具有广泛的应用前景。当前，千瓦级固体激光-熔化极电弧复合热源焊接技术是复合热源焊接技术领域的最热门研究方向，也是最具应用推广前景的复合焊接技术，并已在国内外的汽车制造、造船、压力容器、石化管道、工程机械、军工科技、航空航天、能源电力、轨道交通等领域获得了一定的应用。

激光-MIG 复合热源焊接是激光-熔化极电弧复合热源焊接的一种，是将激光与熔化极惰性气体保护电弧（Metal Inert Gas，简称 MIG）复合获得的一种复合热源焊接方法，通常用于铝及铝合金等有色金属的焊接。图 13-1 为激光-MIG 电弧复合热源焊接的原理示意图。

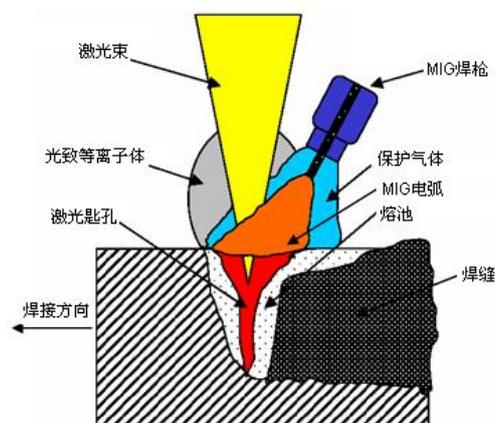


图 13-1 激光-MIG 复合热源焊接原理示意图

第二节 激光-MIG 复合热源焊接设备

激光-MIG 复合热源焊接设备主要由激光器系统、MIG 弧焊电源系统以及复合焊枪三大部分组成。此外，在实际的焊接生产中还必须配备机器人或焊接专机等外部操作与控制设备。图 13-2 为激光-MIG 复合热源焊接系统示意图。

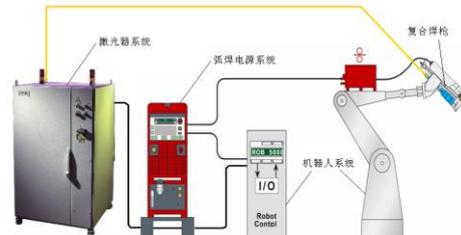


图 13-2 激光-MIG 复合热源焊接示意图

一、激光设备

目前可用于激光-电弧复合热源焊接研究和生产的激光器主要有 CO₂ 激光器、固体激光器和半导体激光器，其中因 CO₂ 激光器和固体激光器的光束质量较高，是目前激光-电弧复合热源焊接中最常用的激光器。近几年来随着固体激光器制造技术的快速发展，先进的固体激光器已逐渐成为激光-电弧复合热源焊接中最常用的激光器。

CO₂ 激光器是最早在材料加工领域获得大量应用的激光器。CO₂ 激光器所使用的产生激光的介质为 CO₂、N₂ 和 He 的混合气体，其气体成分配比根据 CO₂ 激光器设计不同略有差异。CO₂ 激光器发射的激光波长为 10.6 μm，其光电转化效率通常为 10%~15%。目前，已形成商品化的 CO₂ 激光器的最大输出功率可达 20kW。根据冷却方式的不同，可将 CO₂ 激光器分为流动式 CO₂ 激光器和扩散冷却 CO₂ 激光器（也称作板条式 CO₂ 激光器），流动式 CO₂ 激光器通常采用气体热交换器进行散热，根据气体的流动方向，又可分为轴流式和横流式两种类型；根据能量输入方式的不同，还可将 CO₂ 激光器分为直流 (DC) CO₂ 激光器和射频 (RF) 激励 CO₂ 激光器。图 13-2 和图 13-3 分别为轴流式 CO₂ 激光器和板条式 CO₂ 激光器。



图 13-2 轴流式 CO₂ 激光器 (TRUMPF)



图 13-3 板条式 CO₂ 激光器 (Rofin)

CO₂ 激光通常通过镜面反射的硬光路进行传输，难以实现柔性化三维焊接，并且其激光波长为 10.6 μm，由于激光波长较长，被焊材料对 CO₂ 激光的反射率相对较高，特别是焊接铝合金、铜合金等高反射率材料时，CO₂ 激光的能量利用率极低，而固体激光采用光纤传输，易于实现柔性自动化焊接，并且产生的激光波长短（通常在 1.03~1.07 μm），被焊材料对激光的反射率相对较低（主要金属材料对 CO₂ 激光及 Nd: YAG 固体激光的反射率如表 13-1 所示），特别是随着高功率固体激光器制造技术的快速发展和制造成本的降低，在激光焊接及激光-电弧复合热源焊接领域，固体激光器有取代 CO₂ 激光器的趋势。

表 13-1 固态金属对 CO₂ 激光及 Nd:YAG 激光的反射率（室温）

材料	激光（波长 10.6 μm）	Nd: YAG 激光（波长 1.06 μm）
铝	0.98	0.96
铁	0.96	0.70
金	0.99	0.97
铜	0.99	0.95
镍	0.97	0.74
银	0.99	0.96
钽	0.95	0.85
钛	0.92	0.58
锌	0.97	0.84

当前应用于材料加工领域的高功率固体激光器主要有 Nd: YAG 激光器和 Yb: YAG 激光器。Nd: YAG 激光器的工作物质为掺钕钇铝石榴石，工作物质的形状为棒状，受激发射激光的波长为 1.06 μm。根据泵浦源的不同，又可分为灯泵浦 Nd: YAG 激光器和激光二极管泵浦 Nd: YAG 激光

器。灯泵浦 Nd: YAG 激光器是最早出现的高功率固体激光器，形成商品化的灯泵浦 Nd: YAG 激光器的最大额定输出功率可达 4kW。灯泵浦 Nd: YAG 激光器以弧光灯作为泵浦源，而目前作为泵浦源的弧光灯的寿命通常在 1000h 左右，因此灯泵浦的 Nd: YAG 激光器需要定期更换弧光灯，其维护周期较短，而且这类 Nd: YAG 激光器的光电转化效率很低（仅为 1%~3%左右），能量损耗大，运行成本高。激光二极管泵浦 Nd: YAG 激光器是以激光二极管作为泵浦源的固体激光器，因激光二极管的使用寿命较弧光灯有了大幅提高，从而使得激光器的维护周期明显变长，并且由于使用了更高效的泵浦源，激光器的光电转化效率也有了大幅提高（其光电转化效率通常在 10%~20%之间），当前市场上在售的激光二极管泵浦 Nd: YAG 激光器的最大额定输出功率可达 6kW。图 13-4 和图 13-5 分别为弧光灯和激光二极管泵浦的 Nd: YAG 激光器谐振腔工作原理示意图。图 13-6 为弧光灯泵浦的最大额定输出功率为 3kW 的 Nd: YAG 激光器。

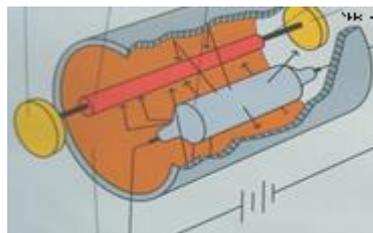


图 13-4 灯泵浦 Nd: YAG 激光器谐振腔工作原理示意图

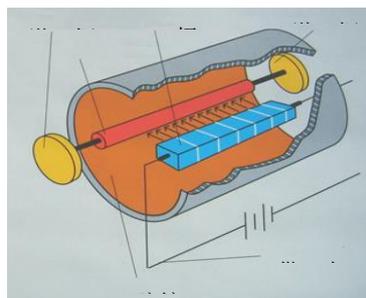


图 13-5 二极管泵浦 Nd: YAG 激光器谐振腔工作原理示意图



图 13-6 弧光灯泵浦 Nd: YAG 激光器

无论是弧光灯泵浦还是激光二极管泵浦的 Nd: YAG 激光器，其工作介质均为棒状，由于受其形状的影响，晶体棒在工作过程中无法实现充分冷却，通常情况下晶体棒的外表面可以获得很好的冷却，但是晶体棒的内部（特别是芯部）冷却效果很差，晶体棒横截面的温度呈高斯分布（如图 13-7 所示），晶体棒的这种温度分布特征严重影响了激光束的特征，使得激光波前发生了扭曲变形（如图 13-7 所示），从而影响了激光的光束质量，这也是为何 Nd: YAG 激光器的光束质量不高且无法获得更高输出功率的 Nd: YAG 激光器的一个主要原因。

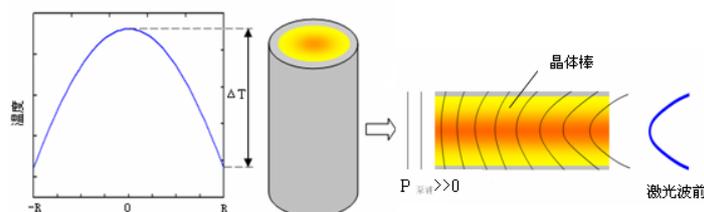


图 13-7 Nd: YAG 激光器晶体棒的热效应示意图

为了进一步提高固体激光的光束质量和最大输出功率，必须对激光工作介质的形状做出改变，以确保工作介质获得充分的冷却，消除或降低工作介质热效应对固体激光的光束质量及最大输出功率的影响，于是便出现了更为先进的光纤激光器和碟形激光器，这两种激光器的工作介质的形状示意图见图 13-8。光纤激光器和碟形激光器均属于 Yb: YAG 激光器，其工作介质均为掺镜钪铝石榴石，并且这两种激光器均采用激光二极管作为泵浦源。随着激光二极管制造技术的快速发展，近几年高功率光纤激光器和碟形激光器发展迅速，目前碟形激光器的最大输出功率可达 16kW，而光纤激光器的最大输出功率则达到了 50kW，并且这两种高功率固体激光器均具有很高的光束质量、更高的光电转化效率和更长的维护周期，譬如光纤激光器，其光电转化效率可达 20%~30%，泵浦源的使用寿命超过了 100000 小时。图 13-8 和图 13-9 分别为光纤激光器和碟形激光器的工作原理示意图。图 13-9 和图 13-10 分别为最大额定输出功率为 6kW 的光纤激光器和碟形激光器。

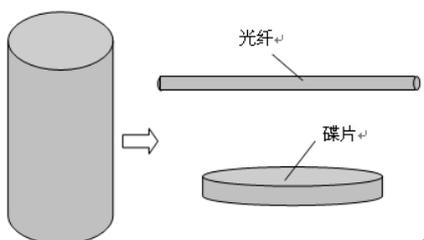


图 13-7 光纤激光器及碟形激光器工作介质形状示意图

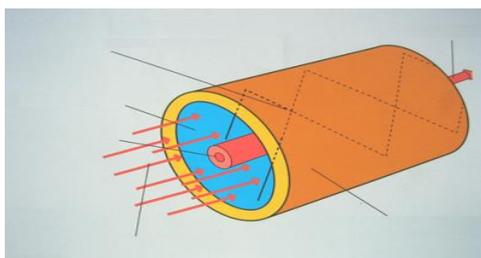


图 13-8 光纤激光器工作原理示意图

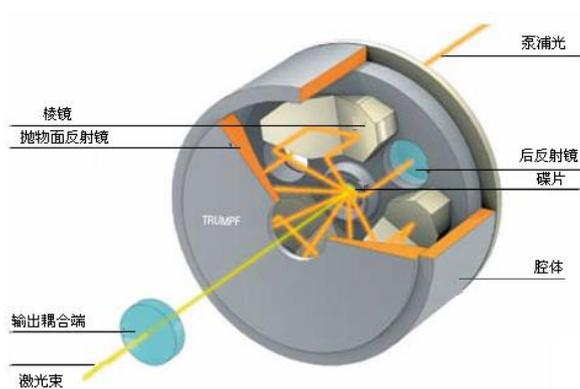


图 13-9 碟形激光器工作原理示意图



图 13-10 6kW 光纤激光器



图 13-11 6kW 碟形激光器

随着激光二极管制造技术的快速发展，半导体激光器近几年也获得了快速发展。当前，市场上

在售的半导体激光器的最大额定输出功率可达 10 kW，其光束质量也有了很大的提高，并且产生的激光可以耦合进光纤，通过光纤实现传输。此外，半导体激光器的体积小，价格便宜。但是，由于受半导体激光器光束质量的限制，目前在材料加工领域半导体激光器主要用于激光钎焊、激光熔敷及激光表面改性等，而很少用于激光-电弧复合热源焊接。图 13-12 为最大额定功率为 4kW 的半导体激光器主体控制柜。



图 13-12 半导体激光器主体控制柜（Laserline）

在上述讨论的几种高功率激光器中，CO₂ 激光采用硬光路传输，难以实现三维柔性化焊接，并且其波长较长，铝合金等高反射材料对其反射率很高，灯泵浦的 Nd: YAG 激光器光电转化效率低，弧光灯使用寿命短，设备运行成本高，半导体激光的光束质量差，焊接适用性差，因此这三种激光器均不是铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接的最佳激光设备。激光二极管泵浦的 Nd: YAG 激光器、碟形激光器和光纤激光器不但具有很高的光电转化效率，而且泵浦源的使用寿命长，激光的光束质量好，均可作为铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接的激光设备，特别是碟形激光器和光纤激光器具有更高的光束质量和更大的输出功率，是当前铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接的理想激光设备。表 13-2 为几种激光器的主要特征比较。

表 13-2 材料加工领域几种常用激光器的特征比较

	激光器	Nd:YAG 激光器（灯泵浦）	Nd:YAG 激光器（二极管泵浦）	碟形激光器	光纤激光器	半导体激光器
工作介质	混合气体	晶体棒	晶体棒	晶体薄碟片	光纤（镜）	半导体
激光波长（ μm ）	10.6	1.06	1.06	1.03	1.07	0.808-1.03
光电转化效率（%）	10-15	1-3	10-20	10-20	20-30	35-55
最大输出功率（kW）	20	4	6	16	50	10
4kW 激光光束质量（mm mrad）	4	25	12	≥ 2	≥ 2	≥ 40

传输方式	硬光路	光纤	光纤	光纤	光纤	光纤
4kW 激光典型光纤 芯径 (mm)	-	0.6	0.4	0.1-0.2	0.1-0.2	0.4
设备体积	大	中	中	中	小	小
移动性	低	低	低	低	高	高
焊接适应性	较低	中	较高	高	高	较低
维修时间间隔 (×1000 h)	2	0.8-1	5-10	≥20	≥100	≥30

二、MIG 弧焊设备

就目前研究及应用状况而言，根据铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接中所采用的 MIG 焊接电源的不同，可将铝及铝合金的激光-MIG 复合热源焊接分为激光-单丝 MIG 复合热源焊接和激光-双丝 MIG 复合热源焊接，所采用的弧焊电源与单独 MIG 弧焊所用的电源相同。由于铝及铝合金材料的特殊性，目前普遍使用逆变数字化焊接电源。有关单丝 MIG 弧焊电源的详细介绍见第七节。

双丝 MIG 焊是一种相对高效的弧焊方法，它可以同时提高焊接速度（焊接速度可达到 2m/min 左右）和熔敷速率。在焊接过程中作为电极的两根焊丝处在同一保护气体环境下，由两个独立的相互绝缘导电嘴送出后熔化并形成同一熔池，每个电极都能独立地调节熔滴过渡方式和弧长。其原理示意图如图 13-13 所示。通常铝合金双丝 MIG 焊接过程中，前丝电弧的焊接电流略大，弧长较短（电弧电压略低），以增加熔深；而后丝则采用比前丝略小焊接电流的规范填充，并且弧长相对略长（电弧电压略高），以获良好的盖面焊缝成形。

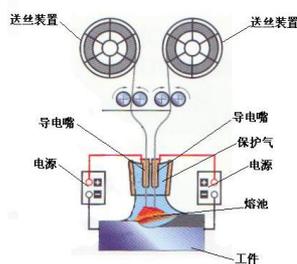


图13-13 双丝MIG电弧焊原理图

双丝MIG焊接电源由两个单丝MIG电源组成，两电源之间增加了一个协同装置，这一系统装置保证在焊接过程中两个电源所产生电弧的相位相差180度左右。双丝MIG焊接电源的每个电源参数均持续可调，且调节范围很大。图13-14为一种典型的双丝MIG脉冲弧焊时2根焊丝焊接电流的相位调节情况。图13-15为FRONIUS公司的数字化双丝MIG焊接电源。

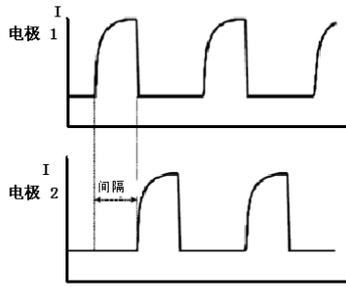


图13-14 双丝MIG脉冲焊时2根焊丝的焊接电流的相位调节情况



图13-15 数字化双丝MIG焊接电源

三、复合焊枪

复合焊枪的枪体主要由激光头、弧焊焊枪以及连接部件三大部分构成，其中激光头和弧焊焊枪是复合焊枪的主体。根据复合焊枪焊接过程中激光与电弧相互作用的空间位置不同，可将复合焊枪分为同轴复合焊枪和旁轴复合焊枪。同轴复合焊枪设计复杂，在激光-MIG 复合热源焊接中多采用旁轴复合焊枪。根据复合焊枪中激光头和弧焊焊枪的连接方式，又可将复合焊枪分为简单机械连接的复合焊枪和一体化复合焊枪。简单机械连接的复合焊枪，易于实现激光头与弧焊焊枪空间位置以及其他焊枪参数的大范围调节，因此比较适合于前期激光-电弧复合热源焊接的试验研究。当前，各国研究机构在进行激光-电弧复合热源焊接试验研究中基本上均使用该简单机械连接的复合焊枪。图 13-16 为欧洲某公司设计的激光-MIG 同轴复合焊枪。图 13-17 为在试验研究中普遍采用的简单机械连接复合焊枪。图 13-18、13-19 和 13-20 分别为哈尔滨焊接研究所、PRECITEC 公司和 FRONIUS 公司设计开发的一体化激光-MIG 复合焊枪。



图 13-16 激光-MIG 同轴复合焊枪



图 13-17 简单机械连接的复合焊枪



图 13-18 哈尔滨焊接研究所的一体化复合焊枪



图 13-19 PRECITEC 公司的一体化复合焊枪



图 13-20 FRONIUS 公司的一体化复合焊枪图

上述讨论的复合焊枪均为激光-单丝 MIG 复合焊枪，在激光-MIG 复合热源焊接的研究和生产应用中，还出现了一些更为高效的复合热源焊接工艺方法，如激光-双丝 MIG 复合热源焊接、激光-MIG 复合热源-双丝 MIG 焊等新的复合焊接工艺。图 13-21 和图 13-22 分别为激光-双 MIG 复合焊枪和激光-MIG 复合热源-双丝 MIG 焊枪。



图 13-21 激光-双 MIG 复合焊枪



图 13-22 激光-MIG 复合热源-双丝 MIG 焊枪

第三节 激光与电弧的相互作用机理

激光-电弧复合热源焊接是一种高速稳定的焊接方法，激光与电弧的复合并不是二者热源的简单叠加，所表现出来的焊接特性也决不是二者简单叠加的效果。在激光-电弧复合热源焊接过程中，激光与电弧会产生一系列的相互作用，从而会引起激光传输特性、电弧物理特性、电弧形态的变化，这些相互作用及特征变化决定了激光-电弧复合热源焊接的本质。

一、电弧对激光的作用

在激光-电弧复合热源焊接过程中，电弧对激光的作用主要表现为电弧对激光能量的吸收、折射和散射。电弧对激光能量的这些影响受激光类型的影响较大。对于波长较长的激光，在穿过电弧等离子体时，电弧对激光的吸收、折射和散射作用较大。而对于波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 的 Nd: YAG 激光，当其穿过电弧时的能量损失很小（对于 2kW 的 Nd: YAG 激光穿过 GMA 电弧时的能量损失仅为 1% 左右），并且电弧对 Nd: YAG 激光的折射和散射作用也非常微弱。

二、激光对电弧的作用

在激光-电弧复合热源焊接过程中，激光对电弧的作用主要体现在激光对电弧的稳定作用，主要包括：激光辅助引弧、激光引导电弧、激光压缩电弧以及电弧的“双重导电”现象。

1、激光辅助引弧

大量的研究表明，在激光-电弧复合热源焊接中，先加入激光再引燃电弧，此时会使得电弧的引燃变得更容易。激光的这种辅助引弧作用主要是因为激光形成的光致等离子体及金属蒸汽为电弧提供了导电通道，与保护气体相比，金属蒸汽具有更低的电离能，这样在电场作用下，电弧易于在导电通道上形成，从而使得电弧的引弧变得更为容易。

2、激光对电弧的引导及压缩

在激光-电弧复合热源焊接过程中，激光产生的光致等离子体及金属蒸汽中的电子和离子密度比较高，在外加电弧后，激光等离子体为电弧提供了一条导电通道，该通道的电阻最小，使得电弧主要集中在该区域内燃烧，电弧电流密度也大为提高，从而使得电弧被压缩并形成激光引导电弧的现象。特别是当激光能量较高，焊接过程产生激光匙孔时，在匙孔上方会产生大量的金属蒸汽，金属原子与来自保护气体的气体原子相比具有更低的电离能，使得该区域导电通道的电阻最小，这样电弧就被强烈地吸附在金属蒸气密度比较高的激光匙孔区域燃烧，形成明显的激光引导电弧的现象。

图 13-23 为利用高速摄像拍摄的复合热源焊接 304 不锈钢时激光加入前后电弧的形态变化。从中可以看出，激光加入后激光对电弧具有明显的吸引作用，并且电弧的轮廓更为清晰，表明电弧在一定程度上发生了压缩。激光对电弧的引导和压缩作用强弱受激光功率、焊接电流以及激光与电弧的间

隔距离等参数的影响较大，一般而言当激光功率较大、焊接电流较小、激光与电弧的距离合适时，激光对电弧的引导和压缩作用显著。

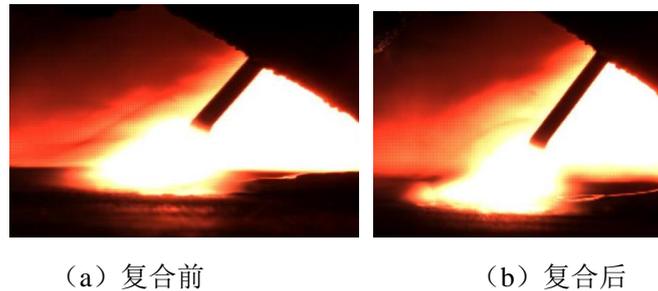


图 13-23 复合前后电弧形态比较

(焊接速度 0.6m/min，激光功率 1000W，电流 166A)

3、“双重导电”机制

哈尔滨焊接研究所在分析 Nd: YAG 激光-脉冲 MAG 复合热源电弧形态时发现，在复合焊接过程中，当激光形成激光匙孔时，激光小孔周围到焊丝端头之间便会产生一条发光带（如图 13-24 所示），借助光谱分析手段确定该发光带的主要成分为电离的铁离子，这一条发光亮带的存在建立了焊丝端头到工件的另一条导电通道，也就是产生了除电弧本身之外的另一个辅助导电通道，由此提出了激光-熔化极电弧复合热源焊接过程中的“双重导电”机制。研究表明，复合热源焊接中的“双重导电”机制能够辅助引燃电弧，在合适的工艺条件下，能够获得更稳定的焊接过程，特别是在高速焊接条件下，“双重导电”机制是能够实现电弧稳定焊接的重要原因。



图 13-24 激光-熔化极电弧复合热源焊接过程中的“双重导电”现象

三、复合焊接的光谱特征

在激光-电弧复合热源焊接过程中，激光加入后电弧的光谱特征发生了很大的变化。哈尔滨焊接研究所研究了 Nd: YAG 激光-脉冲 MAG 复合焊接 Q235 碳钢时电弧的典型谱线特征以及电弧的电子温度和电子密度特征。研究结果表明：复合前后电弧中三个以 Fe 谱线特征谱段（即 250-300nm、355-365nm、485-500nm）在电弧中心区域辐射强度明显增强，说明复合后电弧中心区域的辐射能量

更高，而 Ar 谱线基本保持不变，其谱线特征见图 13-25；对于单独 MAG 电弧而言，电弧辐射强度最高的区域出现在焊丝端部，而熔池表面的电弧辐射强度最弱（如图 13-26a 所示，图中 Z 方向为电弧的测试点距工件表面的垂直距离），当激光与电弧复合后，焊丝端头区域的电弧辐射强度明显削弱，而熔池表面区域的电弧辐射强度明显增加（如图 13-26b 所示），表明复合焊的电弧等离子体的能量更集中作用于熔池表面，提高了焊接电弧对母材的加热效率。此外，与单独弧焊相比，复合后电弧的电子密度和电子激发温度约提高了 10%左右（如图 13-27 和 13-28 所示）。光谱特征分析结果显示，激光-电弧复合热源焊接的电弧能量更为集中。

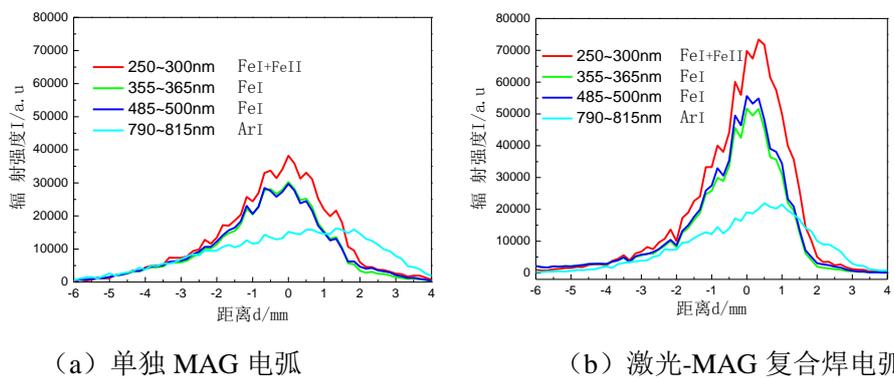


图 13-25 脉冲 MAG 电弧的光谱特征（激光功率 2kW，焊接电流 133A）

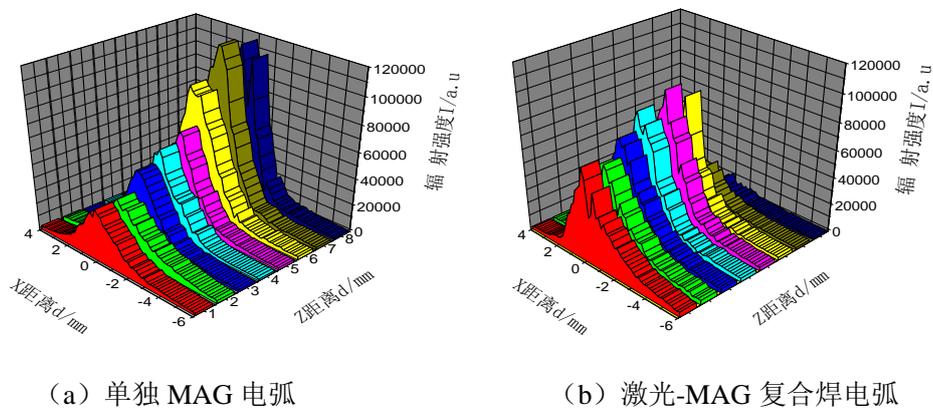


图 13-26 复合前后电弧中 250~300nm 的 Fe II 谱段辐射强度分布
（激光功率 2kW，焊接电流 133A）

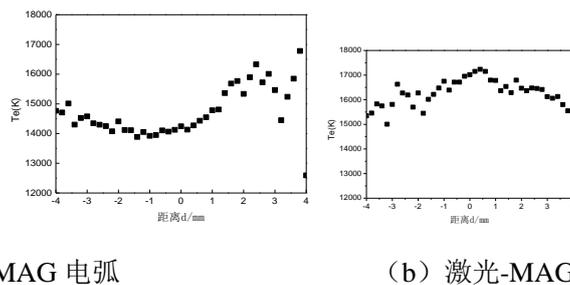


图 13-27 脉冲 MAG 电弧的电子温度特征（激光功率 2kW，焊接电流 133A）

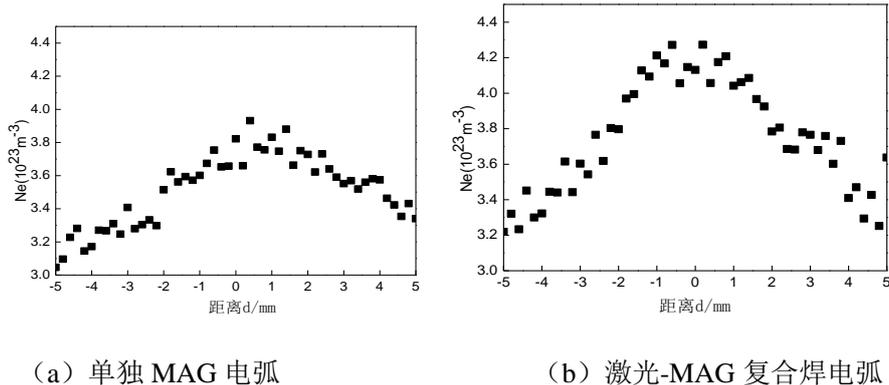


图 13-28 脉冲 MAG 电弧的电子密度特征（激光功率 2kW，焊接电流 133A）

第四节 激光-MIG 复合热源焊接工艺

一、主要焊接工艺参数

与单独 MIG 焊和单独激光焊相比，由于激光-MIG 复合热源焊接采用了两个独立的焊接热源，在焊接过程中必须对两个焊接热源的参数进行合理调节和匹配，以此来获得最佳焊接效果，因此其焊接工艺相对较为复杂。由于激光-MIG 复合热源焊接不是激光焊和 MIG 焊的简单叠加，因此焊接过程中需要调节的工艺参数除了通常激光焊和 MIG 焊所包含焊接工艺参数外，还包括激光与电弧两热源的空间位置参数。

1、焊接速度

激光-电弧复合热源焊接技术的一个重要特点就是可获得高速稳定的焊接过程。如果仅考虑电弧的稳定性及焊缝的表面成形，在铝及铝合金的激光-MIG 复合热源焊接中，即使当焊接速度大于 5m/min 时，电弧仍具有非常高的稳定性，并可以获得良好的焊缝表面成形。如英国 TWI 和德国 CLOOS 在利用固体激光-MIG 复合热源焊接高速列车用铝合金型材（焊接区域的板厚为 3mm）试验中，在保证熔透及获得良好焊缝表面成形的条件下，其最高焊接速度分别可以达到 5.0m/min 和 6.3m/min。但是，在铝及铝合金激光-MIG 复合焊接实际生产中，焊接速度的选择受许多因素的限制，如被焊工件的厚度、坡口的结构尺寸等。通常情况下，当采用激光-MIG 复合热源单道焊接铝合金薄板时，在保证焊缝熔透，焊缝成形及焊缝质量合格的前提下，应当尽量选择较高的焊接速度，因为焊接速度越高，热输入越低，焊后接头的变形越小。在焊接中厚板铝合金时，通常很难实现单道填满坡口，因此多采用多道焊或者多层多道焊，当焊接电流（送丝速度）一定的情况下，焊接速度与坡口填充率是一对相互矛盾的工艺参数，焊接速度越高，单道的坡口填充率越低，也就意味着需要填充的道次越多，而对于绝大多数可热处理强化型铝合金而言，焊接热循环次数对其性能的影响很

大，对于一定厚度的铝合金，当焊接道次超过某一特定道次后，随着焊接道次的增加，接头强度损失严重。因此，在激光-MIG 复合热源焊接中厚板铝合金时，需要对焊接速度、焊接道次及坡口形状尺寸进行合理优化，兼顾焊接效率及接头性能。

2、激光参数

激光-MIG 复合热源焊接中的激光参数主要包括激光功率、离焦量、光斑直径、激光输出模式（连续或脉冲）、激光倾斜角度等。此外，在使用通过光纤传输的激光器进行复合焊接时，首先要选择合适的操作光纤芯径。在激光焊及激光-电弧复合热源焊接中，常用芯径为 0.2mm~0.6mm 的操作光纤。

激光功率和离焦量是决定被焊工件表面激光功率密度的主要激光参数，而激光功率密度的高低是决定复合焊缝熔深的重要因素。所谓的离焦量指的是激光束焦点距被焊工件上表面的距离。通常认为激光束的焦点恰好落在工件的上表面时将离焦量定义为零离焦量，焦点在工件上表面之上为正离焦量，之下为负离焦量。在铝及铝合金复合热源焊接中，所采用的激光功率大小受离焦量的影响较大，通常在制定焊接工艺时，应先选择合适的离焦量，再选择必要的激光功率。由于铝合金材料对激光的反射率较高，因此焊接过程中离焦量的波动对焊缝熔深的影响较大，为保证焊接过程焊缝的熔透性和一致性，应当严格控制离焦量的波动。激光输出模式主要指的是复合焊接采用连续模式激光还是脉冲模式激光。

在激光-电弧复合热源焊接过程中，为了充分利用激光能量，通常将复合焊接中的激光束与被焊工件表面垂直。但是当采用某些固体激光器进行铝及铝合金复合热源焊接时，由于铝及铝合金对激光的反射率很高，当激光功率较高时，将会有大量的激光被反射，如果被反射的激光沿光路返回，可能会对激光光路的耦合部件造成损坏，为了避免这种高反激光对激光光路的损坏，焊接过程中通常将激光束入射方向倾斜一定角度（与垂直方向成一定夹角），如当采用高功率光纤激光-MIG 复合热源焊接铝合金时，激光束的必要倾斜角度（激光束轴线与工件垂直方向的夹角）应 $\geq 10^\circ$ 。

3、MIG 弧焊参数

铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接过程中所涉及的弧焊参数与单独 MIG 焊参数基本一致，主要包括焊丝直径、焊接电流、电弧电压、焊枪倾角、熔滴过渡方式、干伸长、气体成分及气体流量等，但是考虑到焊接过程中激光对电弧的作用，其电弧形态及特性与单独 MIG 弧焊有一定的差异，因此在制定复合焊接工艺时，不可照搬单独弧焊的优化参数，而应当通过工艺优化试验的方法对弧焊参数和激光参数进行合理匹配。此外，与单独 MIG 弧焊相比，通常激光-MIG 复合热源焊接铝合金时的焊接速度较高，而且沿焊接方向复合焊的熔池长度增加，因此为保证复合焊缝具有良好的保护效果，复合焊接过程应略微增加保护气体的流量或采用辅助保护措施。

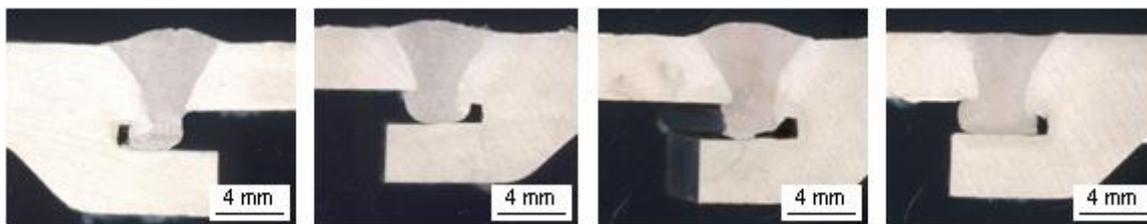
4、激光与电弧的空间位置参数

激光与电弧的空间位置参数是激光-电弧复合热源焊接的重要参数。对于当前最常用的旁轴激光-MIG 复合热源焊接而言，激光与电弧的空间位置参数主要包括焊接过程中激光与电弧的前后位置和激光与电弧的间隔距离。通常沿焊接方向将激光与电弧的前后位置分为激光在前电弧在后和电弧在前激光在后两种，在激光-MIG 复合热源焊接铝及铝合金时，如果采用电弧在前激光在后的复合方式焊接，不易获得理想的保护效果和焊缝成形，因此一般多采用激光在前电弧在后的复合方式。在激光-MIG 复合热源焊接中，激光与电弧的间隔距离通常用“光丝间距”来表征。所谓的光丝间距指的是在被焊工件表面焊丝端头与激光光斑中心沿焊接方向上的间隔距离。光丝间距是激光-MIG 复合热源焊接的一个重要焊接参数，光丝间距的选择是否合适会对复合焊接过程产生很大的影响。在铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接过程中，光丝间距的可选择范围通常在 1mm~6mm 之内。

二、坡口设计

在铝及铝合金的 MIG 弧焊中，由于铝合金的导热系数大，为保证焊缝根部的熔合性，在设计坡口形状时，通常铝合金焊缝的坡口角度要大于相同厚度钢材的坡口角度。但是，在采用激光-MIG 复合热源焊接铝合金时，由于复合焊的热源能量集中，可实现高速、稳定、深熔焊接，因此传统 MIG 弧焊焊接铝合金的坡口设计标准不完全适合于激光-MIG 复合热源焊接。坡口设计受被焊铝合金的材质、材料厚度、接头结构等诸多因素决定，在设计铝合金复合焊接坡口时应当充分考虑这些因素的综合影响。一般而言，为了尽可能地发挥复合焊接的焊接速度优势，同时兼顾填充效率和焊缝质量，铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接的坡口设计原则是尽量减小坡口角度，甚至在某些薄板焊接中可不开坡口。目前，就铝及铝合金的激光-MIG 复合热源焊接的坡口设计尚无相关国际标准及国家标准可循，因此在现阶段铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接中，应当依据焊接工艺评定结果及相关经验来设计复合焊坡口。

在常规 MIG 弧焊焊接铝合金时，有时为了保证焊缝的熔透性，可在对接焊时预留一定的坡口间隙（预留间隙的大小通常依据被焊工件的厚度等具体情况而定），在铝合金激光-MIG 复合热源焊接时，尽管与激光焊相比复合焊中激光对坡口间隙的适应性有了很大的提高，但是当对接间隙超过某一值后，由于焊接间隙过大造成激光束能量损失，将导致无法获得预定焊缝熔深或出现焊缝不连续等现象。图 13-29 为激光-MIG 复合热源焊接铝合金车体型材时，在不开坡口预留不同的对接间隙下获得的焊缝成形。为保证焊缝成形的稳定性和连续性，建议在复合热源焊接铝合金时，对接间隙应控制在 1mm 以内。



(a) 间隙 $a=0\text{mm}$ (b) 间隙 $a=0.3\text{mm}$ (c) 间隙 $a=0.5\text{mm}$ (d) 间隙 $a=0.7\text{mm}$

图 13-29 不同对接间隙下的复合焊缝成形

(焊接速度 4.0m/min ，激光功率 5300W)

三、铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接新工艺

1、激光-超小电流 MIG 复合热源焊接

采用常规 MIG 焊接铝合金薄板构件的主要问题之一就是焊缝熔深及焊接接头变形的控制问题。在很多情况下，通常出现既要保证焊透还需要严格控制焊接变形的情况。从焊接工艺角度考虑，降低热输入量是减少焊接接头变形量的有效方法之一。在相同的焊接速度下，焊接电流越小，接头变形量越小。但是随着焊接电流减小，焊缝熔深也相应减小。由于铝合金的导热系数大，焊接过程散热快，当焊接电流减小到一定程度时，甚至无法形成连续的焊缝，更谈不上焊接了。因此对于常规 MIG 弧焊而言，为了保证焊接接头的可靠性，同时还可获得具有一定熔深的焊缝，就不能采用太小的焊接电流，这无疑也就增加了控制焊接变形的难度。

为了解决铝合金薄板的焊接接头变形大的焊接难题，开发了“一种激光-超小电流 GMA 复合热源焊接方法”，该焊接方法的主要特点是当与激光复合的 MIG 电弧电流很小（MIG 焊的焊接电流最小仅为 15A ）时，仍然可以获得稳定的焊接过程，并可以获得良好的焊缝成形。该焊接方法的优点是能够大幅度降低铝合金薄板焊接的焊接变形，还可以提高铝合金薄板的焊接效率。

图 13-30 为分别采用常规 MIG 焊、激光焊、激光-超小电流 MIG 复合焊三种焊接方法在保证焊缝熔透的情况下焊接 2mm 厚 5A06 铝合金薄板时的焊接变形情况对比，图 13-31 为焊缝横截面照片。焊后按图 13-32 所示对三种不同焊接方法的焊缝纵向变形量进行了测试（测试结果见表 13-3）。变形结果表明，MIG 焊接（传统弧焊）的变形量最大，激光焊接的变形量最小，激光-超小电流 MIG 复合热源焊接的变形量与激光焊接近，仅仅是单独 MIG 焊接变形量的 $1/4$ 左右。

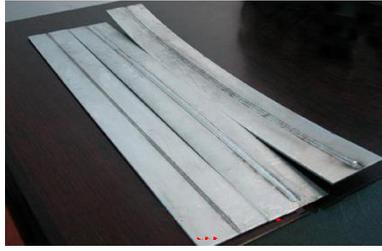
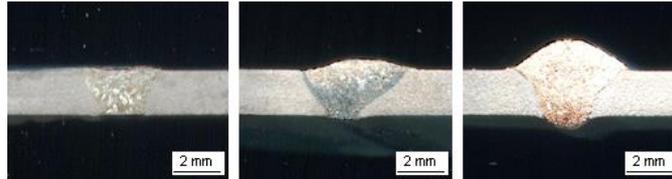


图 13-30 三种对接焊缝成形及变形情况



(a) 激光焊

(b) 复合焊

(c) MIG 焊

图 13-31 焊缝横截面

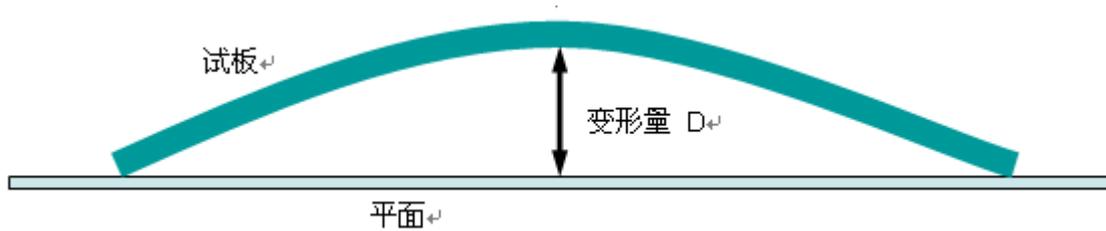


图 13-32 测量焊缝变形量 D 的示意图

表 13-3 三种焊缝试板的平均变形量

焊接方法	工艺参数	热输入 (J/mm)	平均变形量 (mm)
激光	激光功率 1950W	117	2.8
复合	激光功率 1850W, 平均电流 15A, 平均电弧电压 17.2V	126.5	3.4
MIG	平均电流 75A, 平均电弧电 压 16.9V	76.1	14.1

这种低变形的激光-超小电流 MIG 复合热源焊接技术可为铝合金薄板构件的对接焊、搭接焊以及角接焊提供高质量的技术解决方案。图 13-33 为 2mm 厚的 5A06 铝合金薄板搭接焊缝成形形貌。

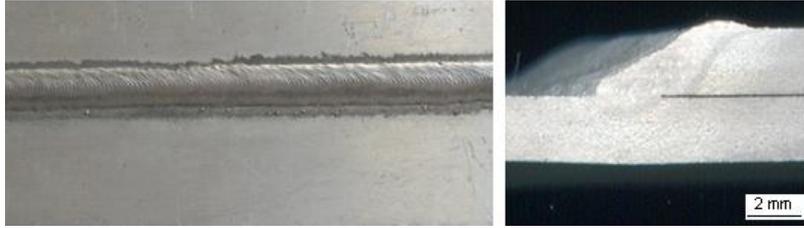


图 13-33 2mm 厚 5A06 铝合金薄板搭接焊

(焊接速度 1m/min, 激光功率 2000W, 焊接电流 15A)

2、铝/钢异种金属激光-MIG 复合热源熔-钎连接

铝或铝合金与钢的异种金属优质焊接一直是焊接领域的一大技术难题，可用于铝与钢焊接的方法主要为固态连接方法（如摩擦焊、爆炸焊、扩散焊、钎焊、磁脉冲焊等），熔化焊焊接铝与钢时，不但焊缝成形差，而且接头内部易产生大量硬而脆的 Al-Fe 金属间化合物，使得接头的机械性能很差，获得的焊接接头不具有使用性能。采用固态连接方法进行铝及铝合金与钢的焊接时，要么焊接效率低，要么容易受工件形状或尺寸的限制，使其应用范围具有很大的局限性。近几年来，逐渐发展了一种可实现铝与钢连接的熔-钎连接方法。所谓的熔-钎连接即是利用异种金属熔点的差异，通过对焊接热输入的控制，保证高熔点金属不发生熔化的前提下让低熔点金属熔化，熔化的低熔点金属及填充金属与高熔点金属实现钎焊连接的一种连接方法。实现铝与钢异种金属优质熔-钎连接的关键是精确控制焊接热输入能量以确保连接界面生成的 Al-Fe 金属间化合物层不发生过渡长大。激光-MIG 复合热源焊接过程中激光能量精确可控，并且焊接过程可实现高速稳定焊接，因此可以更为有效地控制焊接过程的焊接热输入量。激光-MIG 复合热源焊接的这些特点，使其在铝及铝合金与钢的异种金属熔-钎连接中具有独特的技术优势，是一种可实现铝与钢异种金属优质、高效连接的焊接方法。

图 13-34 是在焊接速度为 3.6m/min 下采用激光-MIG 复合热源熔-钎连接方法进行 5A02 铝合金与冷轧热镀锌钢焊接所获得的搭接焊缝成形。研究表明，激光-MIG 复合热源熔-钎连接方法是一种高效的连接方法，在采用该方法进行 5A02 铝合金与冷轧热镀锌钢的搭接焊中，当焊接速度达到 5m/min 时，仍可以获得良好的焊缝成形。

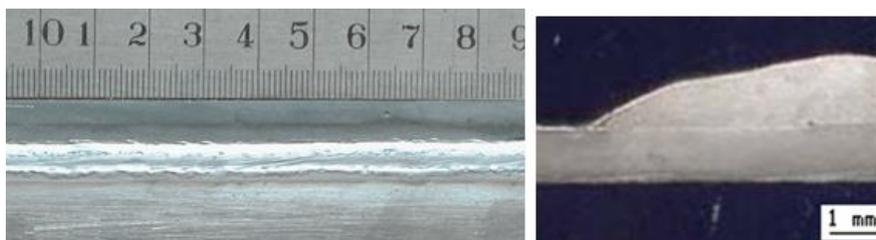


图 13-34 5A02/镀锌钢激光-MIG 复合热源熔-钎焊缝成形

(焊接速度 3.6m/min, 激光功率 2000W, 焊接电流 134A)

利用该方法获得的铝/钢熔-钎接头具有很高的抗拉强度和界面结合强度（剪切强度），其抗拉强度可以达到铝合金试验母材强度的 70%以上，接头连接界面的剪切强度超过了 90MPa，并且在拉伸试验检测中，拉伸试件的断裂位置发生在铝合金的焊接热影响区而非钎焊连接界面。表 13-4 为 5A02 铝合金 MIG 焊接头及 5A02 铝合金/镀锌钢激光-MIG 复合热源熔-钎接头的力学性能比较。

表 13-4 接头的力学性能

	抗拉强度 R_M/MPa	断裂位置	占铝母材的强度比 $\xi/\%$	剪切强度 τ/MPa
5A02 对接 MIG 焊接头	165	热影响区	0.82	-
铝/钢熔-钎接头	153	热影响区	0.76	99.8

尽管在铝与镀锌钢的激光-MIG 复合热源熔-钎接头中仍无法避免 Al-Fe 金属间化合物的产生，但是采用该焊接方法获得的接头中 Al-Fe 金属间化合物层的厚度可以得到很好地控制。研究结果表明，只要焊接工艺参数选择恰当，利用该方法获得的铝/钢熔-钎接头中 Al-Fe 金属间化合物层的厚度通常在 $1.5\ \mu\text{m}\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 之间，当生成的化合物层厚度在此范围内时，Al-Fe 金属间化合物对接头的力学性能影响不大。图 13-35 为在透射电镜下观察到的 5A02 铝合金/镀锌钢熔-钎接头连接界面的 Al-Fe 金属间化合物层微观形貌。

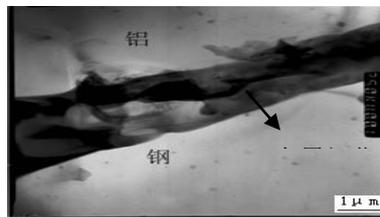


图 13-35 5A02/镀锌钢熔-钎接头连接界面的 Al-Fe 金属间化合物层微观形貌

利用激光-MIG 复合热源熔-钎连接方法不但可以实现铝及铝合金与冷轧热镀锌钢的连接，而且还可以实现铝及铝合金与冷轧热镀铝钢的焊接（焊缝成形见图 13-36），在此焊接过程中，镀层金属（镀锌层、镀铝层）对铝与钢的熔-钎连接具有重要的作用，而对于无镀层金属的普通冷轧钢则很难与铝及铝合金形成有效的熔-钎连接。为实现铝及铝合金与普通冷轧钢的激光-MIG 复合热源熔-钎连接，需要开发一种的特种钎剂，而通过在普通冷轧钢表面涂敷该钎剂，在焊接过程中该钎剂可起到镀锌层（或镀铝层）的作用，从而可以确保铝及铝合金与普通冷轧钢的熔-钎连接。哈尔滨焊接研究所开发的以“ $\text{KAlF}_4(\text{CsAlF}_4)$ 和活性金属”为主要成分的特种钎剂可有效地解决铝及铝合金与普通冷轧钢的熔-钎连接难题。图 13-37 为涂有特种钎剂的待焊的 Q235 钢，图 13-38 为采用激光-MIG 复合热源焊接获得的 5A02 铝合金/Q235 钢熔-钎焊缝成形。利用该特种钎剂并通过激光-MIG 复合热源熔

-钎连接方法得到的铝与普通非镀层冷轧钢连接接头的抗拉强度超过了试验铝合金母材的 75%，接近于铝合金 MIG 熔化焊接头的抗拉强度。

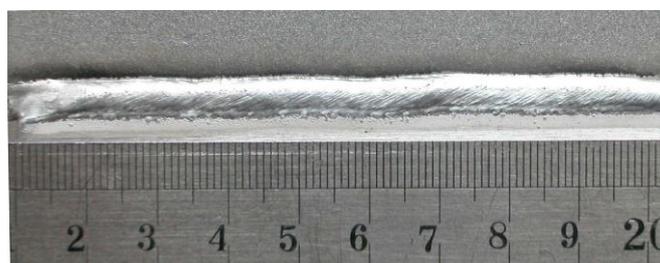


图 13-36 5A02/镀铝钢激光-MIG 复合热源熔-钎焊缝成形

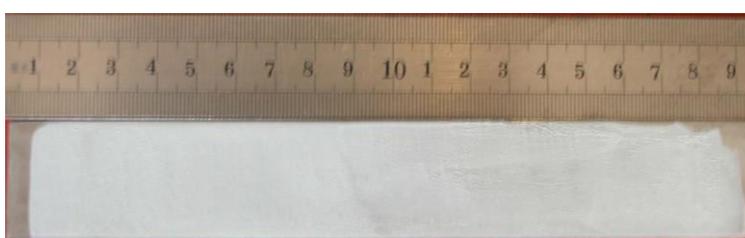


图 13-37 涂有特种钎剂的 Q235 钢板

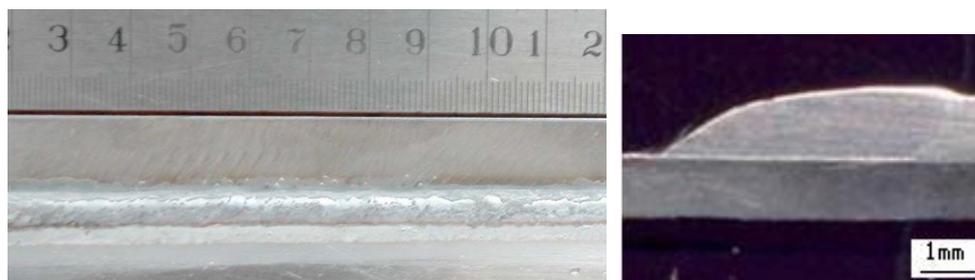


图 13-38 5A02 铝合金/Q235 普通钢激光-MIG 复合热源熔-钎焊缝成形

第五节 铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接接头冶金性能特性

激光-MIG 复合热源焊接铝及铝合金时，由于焊接速度快、焊接热源更为集中，因此其焊接过程的焊接热输入明显小于常规 MIG 焊。复合焊中焊接热输入的降低不但会减小焊接变形量，而且还会降低某些可热处理强化型铝合金焊后接头的软化程度，减小铝合金接头焊后的强度损失，提高其接头强度，尤其是采用激光-MIG 复合热源在高速焊接条件下焊接铝合金薄板时效果更为明显。研究表明，在高速焊接条件下，激光-MIG 复合热源焊接 AlMgSi 系列铝合金 (T4~T6) 时，接头的抗拉强度甚至可以达到母材强度的 85% 左右。图 13-39 是采用不同焊丝在不同的坡口间隙下利用激光-MIG 复合热源焊接 3 mm 厚 AlMgSi1 薄板时的焊态接头抗拉强度比较，图 13-39 中的复合焊接头的平均抗拉强度已达到了铝母材抗拉强度的 86%。图 13-40 为 4mm 厚 AlMgSi0.7 铝合金 (T5、T6) 常规 MIG 焊和激光-MIG 复合热源焊接接头的抗拉强度比较 (复合焊的焊接速度 $\geq 4\text{m/min}$)。研究表

明，对于厚度为 2mm~5mm 的 AlMgSi 系列铝合金，单道 MIG 焊的焊态接头抗拉强度通常仅有母材的 60%~70%，而激光-MIG 复合焊的焊态接头抗拉强度可达到母材的 75%~85%。

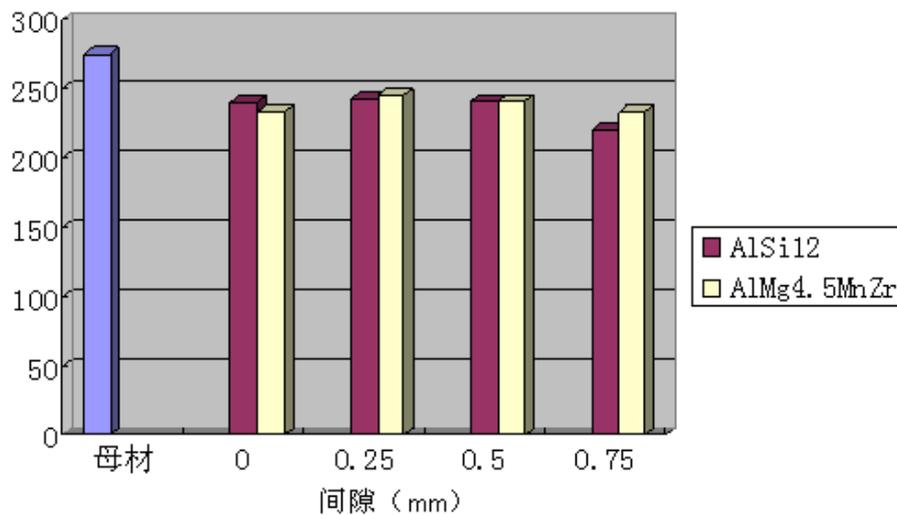


图 13-39 不同焊丝及对接间隙的激光-MIG 复合热源接头强度 (AlMgSi1)

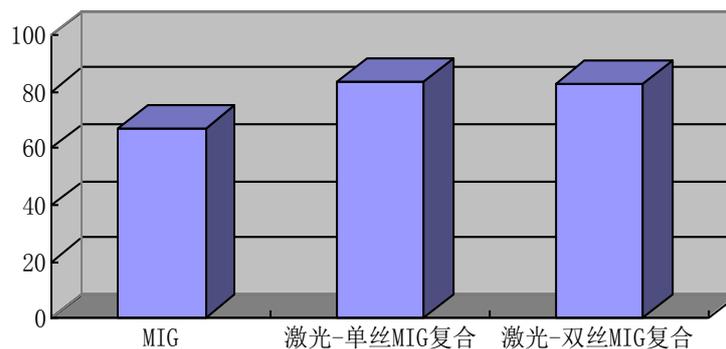
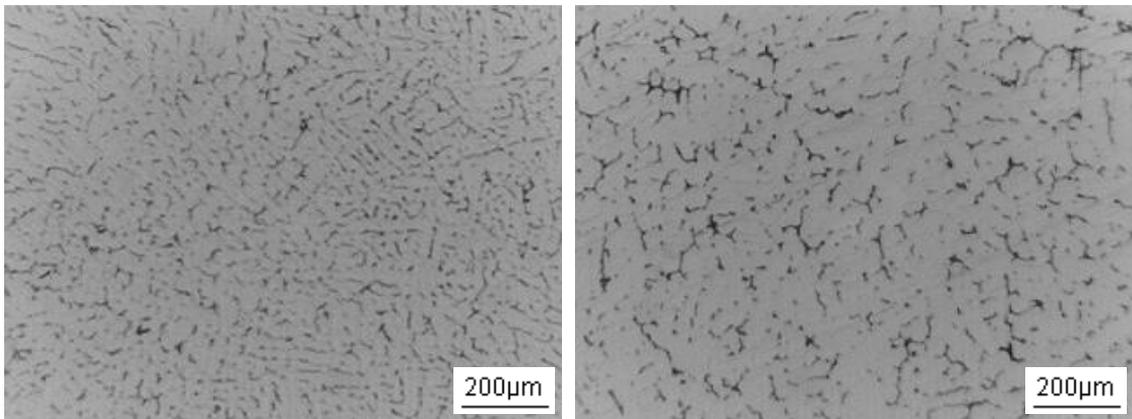


图 13-40 MIG 焊及激光-MIG 复合焊接头抗拉强度比较 (AlMgSi0.7)

对于可热处理强化型铝合金焊后接头强度损失的主要原因是因为在焊接热循环的作用下接头的焊接热影响区出现了软化区间，通常软化区间的宽度越大，软化区间的硬度越低，焊后接头的强度损失越大。与 MIG 弧焊相比，由于激光-MIG 复合热源焊接铝合金时的焊接速度快、热源能量集中、焊接热输入低，焊接过程中焊接热循环对铝合金接头热影响区的热作用降低，从而使得接头热影响区的软化区间宽度变窄，并且软化区间内金属组织的硬度并没有大幅度下降，从而减小了焊后焊接接头的强度损失。

由于复合焊接过程的焊接热输入低，焊后复合焊缝的组织形态也与常规 MIG 焊缝的组织形态存在一定的差异。图 13-41 和 13-42 分别为采用双丝 MIG 焊和激光-双丝 MIG 复合焊焊接 AlMgSi0.7 铝合金时获得的焊缝组织及熔合区组织形态比较。从图中可以看出，激光-双丝 MIG 复合焊缝的柱

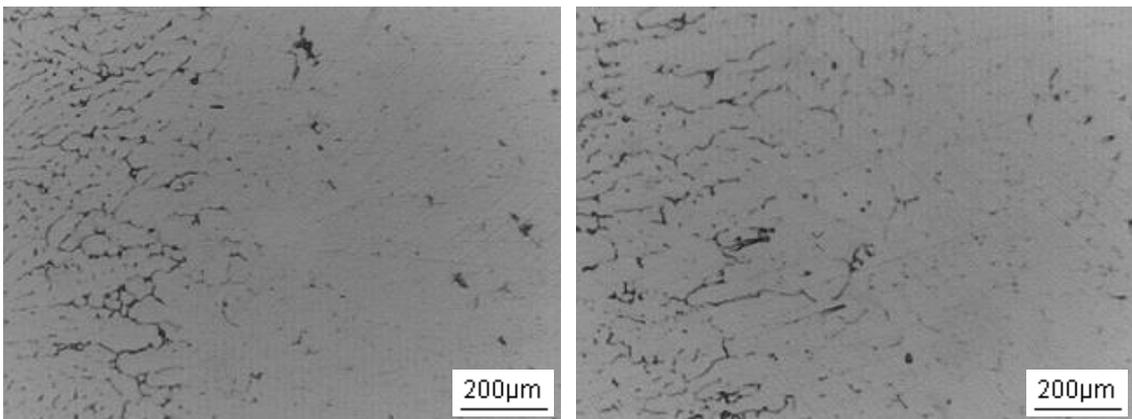
状晶组织要比单独双丝 MIG 焊缝的组织细小，而且激光-双丝 MIG 复合焊缝的熔合区宽度明显比双丝 MIG 焊缝的熔合区宽度窄。



(a) 激光-双丝 MIG 复合

(b) 双丝 MIG

图 13-41 双丝 MIG 及激光-双丝 MIG 复合焊缝组织比较 (AlMgSi0.7)



(a) 激光-双丝 MIG 复合

(b) 双丝 MIG

图 13-42 双丝 MIG 及激光-双丝 MIG 复合焊缝熔合区组织比较 (AlMgSi0.7)

第六节 铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接常见的缺陷及原因

一、间隙过大而造成的未焊透

在激光-MIG 复合热源焊接铝及铝合金时，因被焊工件间隙过大而造成的未焊透是常见的缺陷（如图 13-43 所示）。造成这种现象的原因主要是因为接口间隙过大使得激光束完全或绝大部分通过间隙漏掉，激光能量无法与电弧产生有效作用而熔化被焊金属而获得预定的焊缝熔深。通常解决这种缺陷的最有效途径是减小接口间隙 a 。另外，通过改变激光束的离焦量而增大照射在被焊工件表面的激光光斑直径并同时增加激光的能量也可以解决上述缺陷。

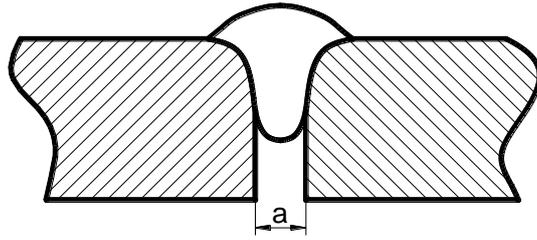


图 13-43 间隙过大而产生的未熔透缺陷示意图

二、粗糙鱼鳞纹

在铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接中，当 MIG 电弧选择脉冲模式时，如果焊接速度较快，并且焊接电流较大，易获得粗糙鱼鳞纹的焊缝（见图 13-44 所示）。适当地降低焊接速度、减小焊接电流均可以有效地改善这种粗糙鱼鳞纹焊缝成形。

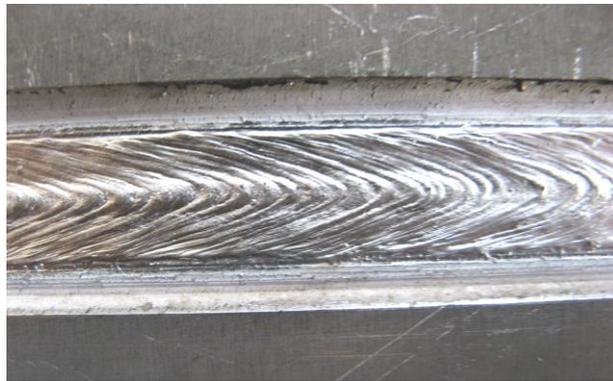


图 13-44 粗糙鱼鳞纹的激光-MIG 复合焊缝

三、气孔

铝及铝合金对气孔有较大的敏感性，气孔问题是铝及铝合金熔化焊所存在的共性问题。在铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接过程中，产生的气孔主要可以分为三类：

(1)、氢气孔：主要是因为被焊铝合金母材及焊材受潮或者焊前表面清洗不充分而残留油污造成的；保护气体中水含量过高以及电弧的不稳定导致的空气中水分的侵入也是产生氢气孔的重要原因。对被焊铝合金母材及焊材进行低温烘干、去除表面的油污以及更换气体等措施对抑制氢气孔的产生均有效。

(2)、焊缝保护不良而产生的气孔（多为氮气孔）。适当降低焊接速度、改变电弧焊枪的倾角、增大保护气体流量，必要时增加辅助保护气体等措施均可抑制该类气孔的产生。

(3)、激光匙孔波动造成塌陷而产生的气孔。当激光功率密度超过某一值后，焊接过程中将会形成激光匙孔，在焊接过程稳定后，形成的激光匙孔在液态熔池金属表面张力、金属蒸汽压力等力的共同作用下建立了动态平衡，如果瞬时的动态平衡遭到破坏，匙孔将不能维持稳定而塌陷，液态金

属来不及填充就造成孔洞。由激光匙孔波动而形成的气孔形态一般不规则，多出现在未熔透焊缝的根部。有关研究表明，采用激光摆动、适当增加工件表面的激光光斑直径、选择脉冲模式的激光、将激光束倾斜一定角度均可在一定程度上抑制该类气孔的产生。

四、热裂纹

与 MIG 弧焊焊接铝合金类似，当采用激光-MIG 复合热源焊接某些型号的铝合金时，如果焊缝液态金属存在一定量的低熔共晶物，或者有较多的杂质在晶界聚集，焊后焊缝在拘束应力及残余应力的作用下，焊缝容易产生热裂纹（图 13-45 为 AlMgSi 系列铝合金焊接过程中产生的焊接热裂纹微观形貌）。消除焊接热裂纹的常用措施通常有工艺措施、冶金措施以及改变焊接接头的受力状态。由于焊接过程中改变焊接接头的受力状态相对比较困难，因此工艺措施和冶金措施是最常用的手段，如减小焊接热输入的一些列措施、改变坡口形状及尺寸、合理选择焊丝体系等。

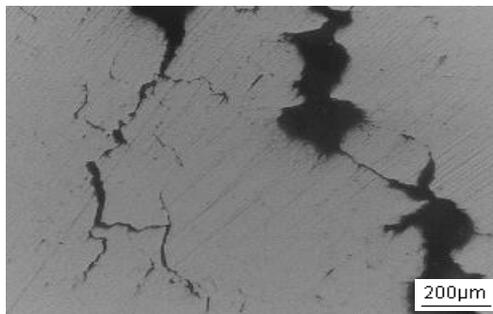


图 13-45 焊接热裂纹微观形貌（AlMgSi0.7）

五、其他缺陷

与 MIG 焊焊接铝及铝合金类似，激光-MIG 复合热源焊接铝及铝合金时，也会产生错边、咬边、层间缺陷等其他缺陷。常规 MIG 焊解决这些缺陷的措施对于复合热源焊接同样有效。

第七节 铝及铝合金激光-MIG 复合热源焊接技术的应用

激光-电弧复合热源焊接技术已经在造船、汽车、轨道交通、压力容器、工程机械、能源、军工科技等领域获得了一定程度的推广应用，在这些应用领域，多以钢结构为主，而对于激光-MIG 复合热源在铝及铝合金结构件焊接中的应用，当前处于迅速发展阶段。

激光-MIG 复合热源焊接技术最早在高端铝合金汽车制造中获得了成功应用。德国大众汽车公司早在 2000 年左右将激光-MIG 复合热源焊接技术成功应用于了奥迪 A8 铝合金车体及辉腾 2002 铝合金车门的焊接，并建立了铝合金车体激光-MIG 复合热源焊接生产线。图 13-46 和图 13-47 分别为奥迪 A8 豪华铝合金轿车及其铝合金车体激光-MIG 复合热源焊接生产线。图 13-48 和图 13-49 分别为

辉腾 2002 铝合金豪华轿车及利用激光-MIG 复合热源焊接的铝合金车门。其中,对于辉腾 2002 轿车,共有 48 条激光-MIG 复合热源焊缝,焊缝的总长度达到了 5370mm。

此外,激光-MIG 复合热源焊接技术还在铝合金汽车零部件的焊接及大型航空模具工装的低变形修复中获得了应用(分别见图 13-50 和 13-51)。



图 13-46 奥迪 A8 铝合金豪华轿车

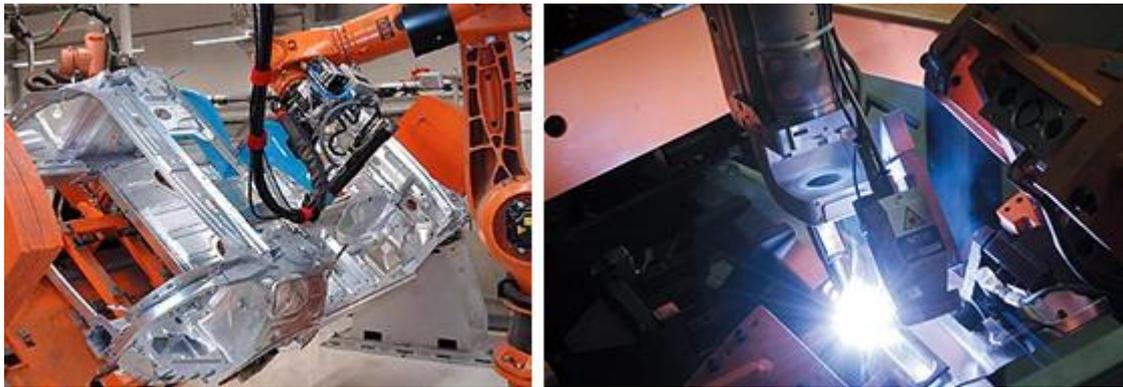


图 13-47 奥迪 A8 铝合金车体焊接生产线



图 13-48 辉腾(Phaeton2002)铝合金豪华轿车

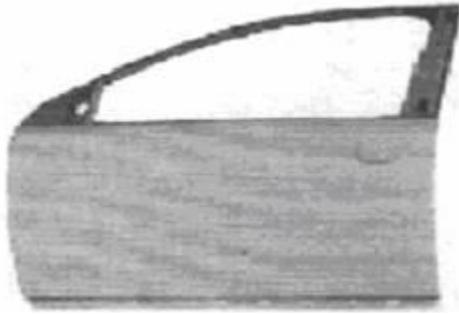


图 13-49 激光-MIG 复合热源焊接的辉腾(Phaeton2002)铝合金车门

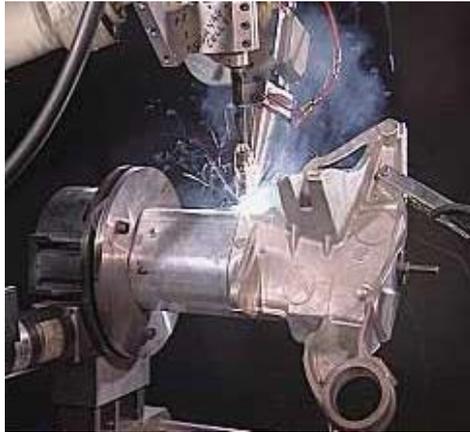


图 13-50 激光-MIG 复合热源焊接铝合金汽车部件 (TWI)



图 13-51 利用激光-MIG 复合热源焊接修复大型航空模具工装 (哈焊所)

图当前，国外许多著名的焊接研究机构（如英国的 TWI、德国的 BIAS 和 CLOOS 等）正在利用激光-MIG 复合热源进行铝合金型材的高速焊接试验研究，并力争将激光-MIG 复合热源焊接技术应用于高速列车铝合金车体的焊接生产中，以解决当前 MIG 弧焊焊接高速铝合金列车型材所出现的接头强度软化较为严重、焊接变形大等焊接技术问题。图 13-52、图 13-53 和图 13-54 分别为英国 TWI、德国 BIAS 及哈尔滨焊接研究所进行激光-MIG 复合热源焊接铝合金型材的焊缝成形照片。

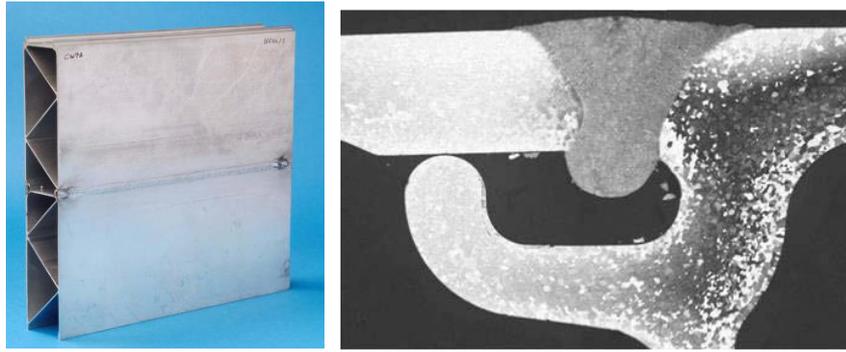


图 13-52 铝合金型材激光-MIG 复合热源焊缝成形 (TWI)

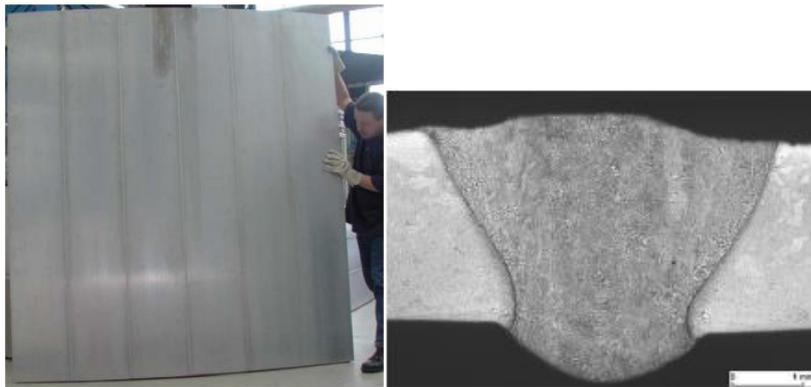


图 13-53 铝合金型材激光-MIG 复合热源焊缝成形 (BIAS)



图 13-54 铝合金型材激光-MIG 复合热源焊缝成形 (哈焊所)

第八节 激光安全防护

随着激光在材料加工领域的普及和推广，激光的安全防护已显得越来越重要。特定波长及超过某一功率值的激光会对暴露在激光辐射区域的人体的眼睛和皮肤造成损伤。一般而言，人的眼睛比人的皮肤更为脆弱。这主要是因为与皮肤不同，眼睛的角膜（眼球透明的外前表面）没有死细胞的外表层保护，在光谱的远紫外或远红外区域，眼睛的透镜体容易受到损伤。研究人员通过试验对有激光辐射设立了安全暴露极限，即所谓的**MPE**（maximum permissible exposures，最大允许暴露值），

激光安全专业人员以此为基准，将激光产品对人体的安全等级分为 I ~ IV 级。

I 级：在正常的操作过程中不会对人体的眼睛及皮肤造成任何损伤，因此不用采取任何控制措施或其它形式的监管。

II 级：低输出的可视激光（功率 0.4mW-1mW），人闭合眼睛的反应时间为 0.25 秒，用这段时间算出的曝光量不会超过 MPE 值。如果在无辅助设备的情况下进行观察时，人眼的反感反应可使眼睛得到保护。然而，如果用特定的光学辅助仪器进行观察可有潜在的危害。

III 级：中等输出功率的激光，直接和镜面反射条件下观察可能会对眼睛造成损害。

IV 级：直视 IV 类激光束或将皮肤暴露在激光束面前会对眼睛和皮肤造成伤害，并有可能产生散射或燃烧危害，也可以产生悬浮污染物和有害的等离子体辐射。

尽管激光安全防护已经引起了业内人士的重视，但是当前有关激光安全标准体系还不完善。目前，在激光的安全与防护领域最常用的是美国国家标准研究院的 Z136 系列激光标准。

在铝及铝合金的激光-MIG 复合热源焊接领域，基本上均采用高功率激光器，其激光安全等级为 IV 级，因此激光的安全防护非常重要，尤其是注意对眼睛的保护。在焊接过程中，直视激光或经镜面（或光亮表面）反射的激光以及由漫散的表面（非镜面）反射的激光均会对人体的眼睛造成损害。当前，针对高功率激光的激光安全防护装置主要有激光安全眼镜、激光安全工作间、激光安全窗、激光安全屏及激光安全帘等。激光安全眼镜是激光加工现场操作人员用于保护眼睛的最直接、最有效的装置，因此在高功率激光加工过程中，进入工作现场的人员必须佩戴与该激光器安全防护等级及激光束特征匹配的安全防护眼睛。激光安全间是将整个激光加工区域封闭于某个用特定材质制作的小室内，小室侧壁上留有激光安全防护玻璃（激光安全窗），激光加工过程中，操作人员在激光安全间的外部，并通过激光安全窗对加工过程进行实时观察。这种激光安全工作间具有非常高的安全防护等级。如果工作现场不具备使用激光安全工作间，也可以使用局部激光安全窗、激光安全屏（或帘）。依据 Z136.1 标准，对该类激光或激光系统，在所有操作、维护和服务环境下，应指定专门的激光安全员。

激光安全防护已在欧美等激光技术发达国家已引起了人们的足够重视，但是在我国的激光加工领域，由于受激光技术发展水平及激光安全知识普及程度的限制，人们对激光安全防护重要性的认识不足，因此尚需要行业服务机构及国家职能部门对激光安全防护进行普及宣传及规范约束。