



证券简称 锐科激光 证券代码 300747

激光焊接方法之 激光-电弧复合焊接



武汉锐科光纤激光技术股份有限公司

地址：中国武汉东湖开发区高新大道999号

电话：+86-27-81338818

邮箱：sales@raycuslaser.com

传真：+86-27-81338810

网址：www.raycuslaser.com

行业需求激发焊接技术升级

在当今的轨道交通、船舶制造、核电设备等行业，中、大厚度的钢板焊接需求越来越多。近年来，为促进我国船舶工业发展，国家相继出台优先发展高技术船舶、高附加值船舶，加快船舶工业转型升级等政策，而且世界造船的趋势也向着大型化、多样、高档化发展。焊接技术是船舶加工制造以及船舶工业发展中的一项关键技术，焊接工时约占到建船总工时的30%~40%。此外矫正焊后变形也大大增加了船舶装配制造的总工时及总成本。焊接生产效率和焊接质量直接影响到船舶加工制造的生产周期、成本费用以及船体质量等。因此，高效优质的船舶焊接技术是实现我国船舶工业转型升级的重要影响因素，也是提高我国船企国际竞争力的重要因素。

另外，核电设备及轨道交通的蓬勃发展，均会广泛的应用焊接技术，尤其是随着我国铁路列车行业的高速发展，列车的不断提速，作为轨道车辆重要部件的转向架承载了更大的动载荷，这对转向架技术提出了更高的要求，转向架构架在设计、材料、工艺上必须不断的发展进步以满足性能的要求，焊接接头的质量成为了保证转向架构架质量的重要环节之一，因此，新的焊接方法、优化的焊接参数是必要条件。

激光-电弧复合焊接应运而生

激光-电弧复合焊接作为一种新的焊接技术，它是利用激光和电弧作为双重热源，同时作用在同一熔池，形成激光引导并稳定电弧，电弧提高金属对激光吸收率，增强熔滴过渡桥接能力的一种焊接方法，充分发挥了激光焊和电弧焊的优势，又弥补了各自的不足。很多国内外学者都在进行研究，其应用也日益广泛。尤其是在中、大厚度的材料焊接方面，复合焊接技术具有更大的优势。因为传统的焊接方法会存在诸如接头强度低、效率低、变形严重、焊材消耗量大等缺点；而且采用单激光焊接也存在一些不足，诸如接头装配工艺要求高、焊

接能力受激光功率的制约大、桥接能力差、焊缝咬边严重等。

激光-电弧复合焊作为一种新型的焊接方法，它具有以下三个显著特点：

1. 提高能量利用率，增加焊缝一次熔透深度、焊接速度；
2. 降低工件装配要求；
3. 提高焊缝质量，改善焊缝成型；

激光-电弧复合焊接可实现 $1+1>2$

激光-电弧复合焊接有多种形式，包括Laser-MAG/MIG复合焊接、Laser-TIG复合焊接、激光-等离子弧复合焊接等，其中现阶段常用的激光光源可以是如图1所示的光纤激光，以及如图2所示的半导体激光，本文以Laser-MAG复合焊接为例来展开讨论，其形式如图3所示，焊接方法的基本元素由激光束、焊丝（焊枪）、待焊工件组成，保护气体根据实际需要决定是否添加以及选择合适种类，所涉及的主要设备有送丝机、焊机、复合焊硬枪头（填丝焊软枪头）、焊接头、高功率激光器。



图1 高功率光纤激光器



图2 高功率半导体激光器

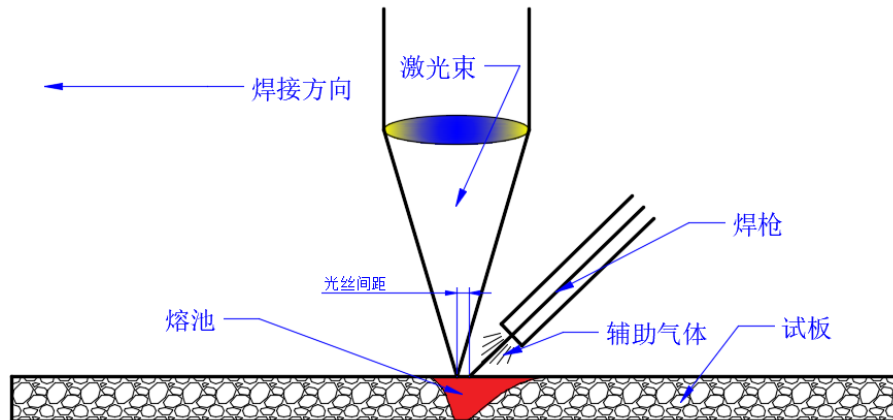


图3 Laser-MAG复合焊接

Laser-MAG复合焊接，有两个焊接热源，分别是激光和MAG电弧，单独作为热源焊接时均可形成有效熔池，但是熔池的特征不一样：激光焊接熔池的特征是“深而窄”，开口面积小，深度大，不利于焊缝成型；MAG电弧焊接熔池的特征是“浅而宽”，开口面积大，深度小，有利于焊缝成型，桥接能力强。在Laser-MAG复合焊接过程中两个热源同时作用于母材，两个热源之间存在着相互影响，而且两个熔池之间也存在着相互影响，最终会形成一种新的复合熔池，该复合熔池同时具备激光熔池的“大深度”和电弧熔池的“大面积”，这种复合熔池的深度大、焊缝成型较好、桥接能力强，同时，因为MAG电弧焊接时有焊丝填充，并且焊丝种类可以选择，所以可以针对母材本身的性能缺陷，选择合适的焊丝添加到焊接过程中，从而在微观层面上对焊缝的抗裂性、抗疲劳性、耐腐蚀性、耐磨性等方面进行有目的性的改善。除此之外，在整个焊接过程中，有两个热源作用于母材，其间的相互影响是能够增大熔深，实现“1+1>2”的效果，因此激光-电弧复合焊接的单次熔透能力会显著提高。最后，激光-电弧复合焊接可以实现多道堆叠焊接，可以实现大厚度材料的焊接，并且因为电弧的原因上下焊道以及侧壁的熔合能力非常强。

三、应用现状

随着激光-电弧复合焊接技术的发展,其应用范围越来越广泛,尤其是在国外应用较多,而在国内应用极少,具有广阔的前景,其应用的主要领域有以下几个:

1. 船舶制造

在所有制造业中,造船业是激光-电弧复合焊接技术最大的受益者。欧洲的一些船厂为了维持其高附加值造船业上的优势,广泛采用激光-电弧复合焊这一技术,在厚板焊接应用中,极大的提高了焊接质量和生产效率。具有典型代表意义的是德国的Meyer造船厂已经全部采用激光-电弧复合焊接方法进行轮船的焊接。

2. 汽车工业

德国率先将激光-电弧复合焊接技术应用于汽车的车门、侧围等部件的连接制造,学者Graf T等人在汽车焊接国际论坛上的报告《激光复合焊在大众和奥迪汽车上的应用[C]》中有介绍称在大众辉腾轿车的前门上共有66条焊缝,焊缝总长度达4.98m,其中有48条激光-电弧复合焊缝;奥迪A8轿车的车体框架总复合焊接长度达到了4.5m。

新能源汽车正在蓬勃发展,其动力核心是动力电池,为了降低整体车重,动力电池的托盘一般都选择使用铝合金制造,托盘是拼装焊接,每个托盘的焊缝多达数十条焊缝,而且焊缝强度要求高,焊接效率要求高,传统弧焊及常规的激光焊接很难满足要求,而激光-电弧复合焊接是非常符合需求的连接方法。

3. 石油化工工业

据石油运输管道的激光-MAG电弧复合焊接工艺研究发现,焊后与单独使用激光作为热

源进行对比，采用激光-电弧复合焊可增加20%的熔深，焊接过程更加稳定，有少量飞溅，焊缝成型较好，具有良好熔宽比，无咬边、未融合等焊接缺陷，焊后经X射线探伤气孔控制在一定范围内，不影响焊接接头质量，满足工程要求。

油罐属于压力容器，对焊接次序和焊缝质量都有严格的要求。在油罐制造业中，需要焊接的部位大多是环焊缝，并且需要在油罐内外两面进行焊接，油罐内部的空间有限，给焊接带来了一定的局限。采用Laser-MIG复合焊对油罐进行焊接，由于激光的加入使焊缝熔深得到了很大的提高，从而可以进行单面焊，避免了双面焊给操作带来的不便。不仅在焊缝质量得到了提高，还在提高焊接效率及生产能力方面取的巨大的突破。目前，激光-电弧复合焊已广泛应用于德国油罐制造业中。

4. 航空航天领域

在航天领域，哈尔滨工业大学、上海航天精密机械研究所突破了中厚板高强钢的激光-MIG/MAG 电弧复合焊接技术，吴艺超等人在《30CrMnSi 激光-GMA 复合焊接工艺参数对焊缝成形的影响[C]》介绍称已将该焊接技术应用于某航天重要结构件，实现了 7mm 厚 3CrMnSiA 无预热激光-MAG 电弧复合焊接，大幅度地降低了工人劳动强度和提高了焊接生产效率。

应用案例及设备和工艺参数建议

1. 应用案例

(1) 铝合金焊接

要求：5mm、6mm 铝合金拼焊，要求焊缝成型较好，不能有咬边缺陷。

设备：RFL-C6000 (光纤芯径 200 μ m)、一元化焊机 (自带电弧电压、电流、送丝量匹配

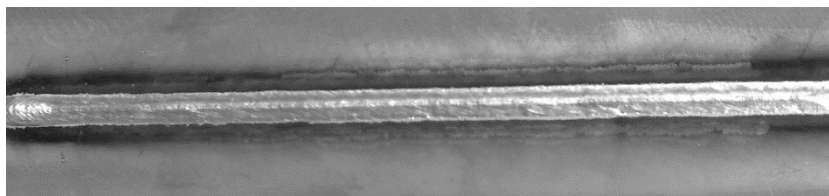
数据库)、送丝机、焊接头 (准直镜焦长 100mm, 聚焦镜焦长 300mm)。

工艺参数: 如表1所示。

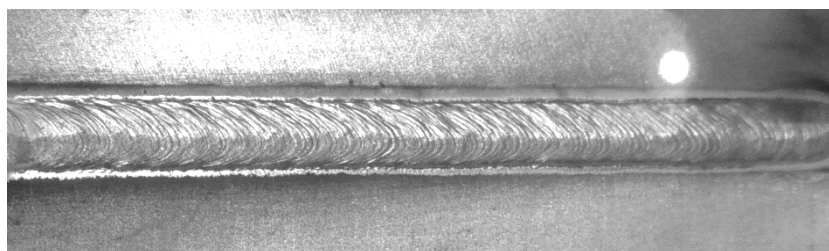
表 1

板厚 (mm)	激光功率 (W)	焊接速度 (mm/s)	送丝速度 (m/min)	离焦量 (mm)
5mm	4000	25	6	0
6mm	4000	25	7	0

结果: 成型较好, 焊缝无咬边缺陷, 如图 5 所示。



a. 5mm铝合金对接接头



b. 6mm铝合金对接接头

图5 焊缝成型

(2) 中厚船板焊接

要求：6mm 厚 AH36 船用钢板拼焊，要求焊缝成型及焊缝质量均满足中国造船质量标准 (GB/T 34000-2016) 要求。

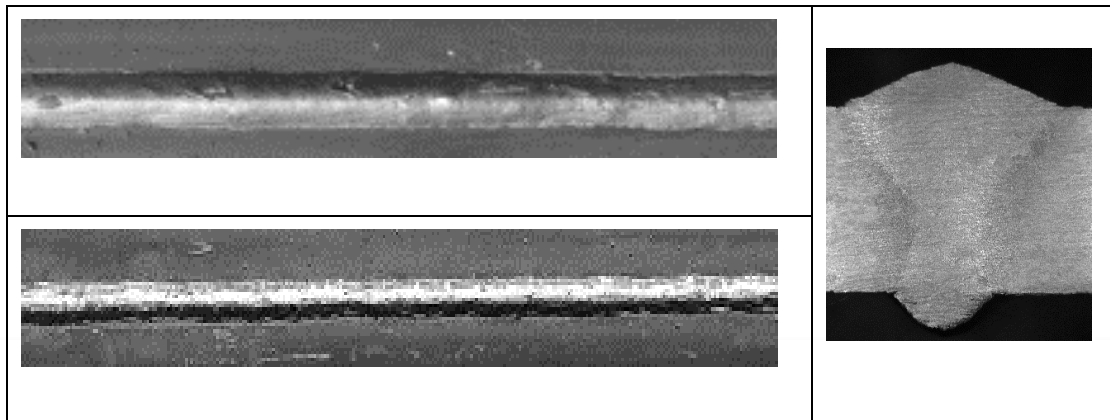
设备：RFL-C12000 (光纤芯径 200 μ m)、一元化焊机 (自带电弧电压、电流、送丝量匹配数据库)、送丝机、焊接头 (准直镜焦长 100mm，聚焦镜焦长 500mm)。

工艺参数：主要焊接工艺参数如表 2 所示。

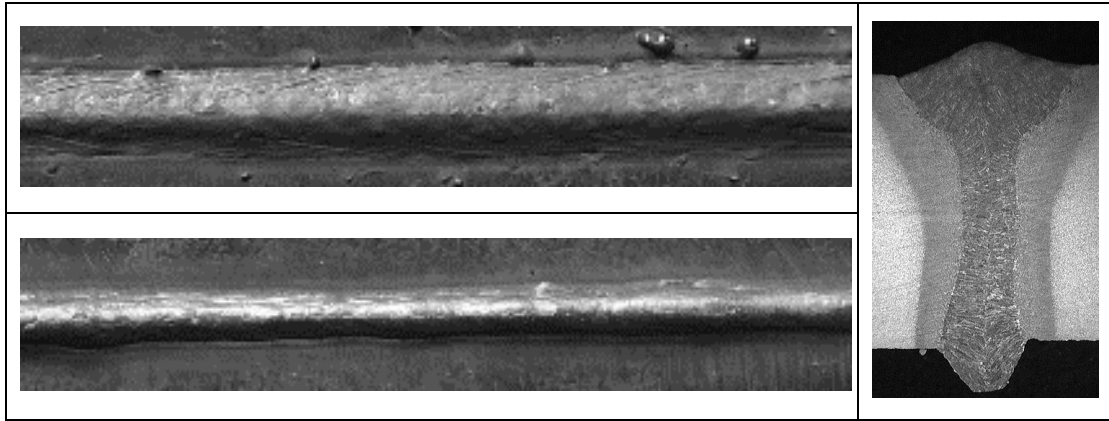
表2

板厚 (mm)	激光功率 (W)	焊接速度 (mm/s)	送丝速度 (m/min)	离焦量 (mm)
6mm	6500	25	8	0
10mm	10000	20	9	0

结果：焊缝成型较为均匀一致，焊缝基本无气孔，如图6所示，其成型及焊缝质量、性能经过测试均满足要求。



a. 6mm厚AH36



b. 10mm厚AH36

图6 焊缝成型

(3) 大厚度船板多道焊接

要求：20mm 厚的超高强船用钢板拼焊，要求焊缝成型及焊缝质量均满足中国造船质量标准（GB/T 34000-2016）要求。

设备：RFL-C12000（光纤芯径 200 μ m）、一元化焊机（自带电弧电压、电流、送丝量匹配数据库）、送丝机、焊接头（准直镜焦长 100mm，聚焦镜焦长 300mm）。

工艺参数：焊道必须开坡口，坡口尺寸如图 7 所示，其他焊接工艺参数如表 3 所示。

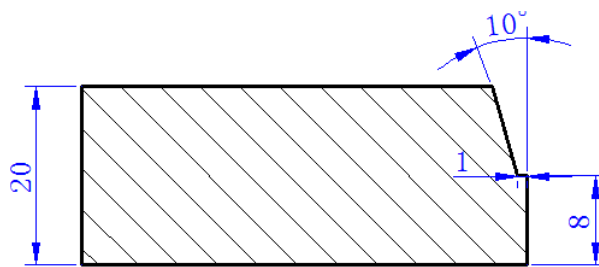


图7 坡口尺寸

表3

焊道次序	激光功率	焊接速度	送丝速度	离焦量
------	------	------	------	-----

	(W)	(mm/s)	(m/min)	(mm)
1	11000	20	8	0
2	4000	15	14	0
3	4000	15	14	0
4	4000	15	14	0

结果：成型较好，没有出现未熔合，焊缝基本无气孔，如图8所示，其成型及焊缝质量、性能经过测试均满足要求。

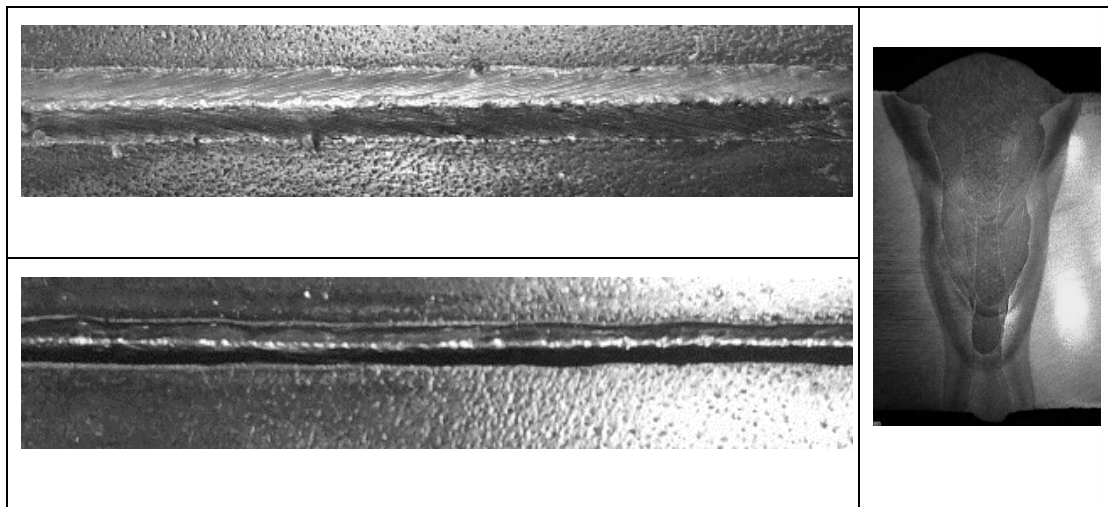


图8 焊缝横截面金相图

2. 设备及工艺参数建议

目前，对于激光-电弧复合焊接这一技术来说，国内实际应用的极少，现阶段研究成果也相对匮乏，暂时并无系统性成果出现，除此之外，还有一个关键问题就是激光-电弧复合焊接的桥接能力非常大，可以焊接较大间隙的接头，从焊缝成型来看，其容许间隙可达1mm，

而接头的拼缝间隙对工艺参数窗口影响较大，

这也会带来同样板厚多次试验时因为间隙不同而导致所用参数差别比较大，所以在这里对于工艺数据建议及设备选型建议只能给两个引导性建议：

(1) 基于国外的研究成果以及自身试验结果，建议在进行设备选型时：①保证一定的聚焦光斑直径，在0.5mm~1.2mm之间较为合适，光斑过大会带来激光器功率需求剧增，过小的光斑在焊接较厚板材时焊缝并不十分稳定；②焊机在选择时务必选用具有脉冲功能的，否则飞溅会很难控制；

(2) 至于焊接工艺参数方面，则需根据具体情况来确定，有几点需要注意：①焊接速度控制在3m/min以内较为合适，过大的焊接速度会带来焊缝成型不均匀，并且咬边较严重；②焊枪与焊缝的夹角在大于40°时较为合适，否则容易成型不均匀；③焊接碳钢时采用混合气体最好（Ar：CO₂=82%：18%），焊接铝合金时采用纯Ar；④光丝间距（光斑落点与焊丝落点之间的距离）一般控制在1~3mm，过小的间距会带来较大的飞溅以及成型不稳定，过大的间距会减弱两个热源之间的相互作用，不能体现其“1+1>2”的优势。