



新材料研究系列丛书

RESEARCH ON THE INTERACTION
MECHANISM AND PROCESS OF HYBRID
LASER-DOUBLE-ARC WELDING

激光+双电弧复合焊接 热源耦合机理及工艺研究

顾小燕 著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

江苏省品牌专业建设工程 (PPZY2015A027)

RESEARCH ON THE INTERACTION MECHANISM
AND PROCESS OF HYBRID LASER-DOUBLE-ARC
WELDING

激光+双电弧复合焊接 热源耦合机理及工艺研究

顾小燕 著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

图书在版编目(CIP)数据

激光+双电弧复合焊接热源耦合机理及工艺研究 / 顾小燕著. — 镇江: 江苏大学出版社, 2018. 12

ISBN 978-7-5684-0998-8

I. ①激… II. ①顾… III. ①激光焊—电弧焊—研究
IV. ①TG456.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 298028 号

激光+双电弧复合焊接热源耦合机理及工艺研究

Jiguang+Shuangdianhu Fuhe Hanjie Reyuan Ouhe Jili Ji
Gongyi Yanjiu

著 者/顾小燕

责任编辑/郑晨晖

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江市江东印刷有限责任公司

印 刷/句容市排印厂

开 本/890 mm×1 240 mm 1/32

印 张/4. 125

字 数/118 千字

版 次/2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0998-8

定 价/30.00 元



如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)



顾小燕 江苏科技大学材料科学与工程学院焊接技术与工程专业讲师。2013年毕业于天津大学材料加工工程专业，获博士学位。研究领域包括激光电弧复合焊热源耦合机理及工艺、高效/高能束焊接方法与工艺、缆式焊丝电弧焊接方法与工艺等。主持江苏省自然科学基金1项（已完成），国家自然科学基金青年基金1项，参与完成国家自然科学基金3项。发表专业论文10余篇，其中SCI检索5篇。

责任编辑：郑晨晖

装帧设计：孙妍

试读结束：需要全本请在线购买：www.ertongbook.com

前 言

激光电弧复合热源焊接方法是一种新兴的材料加工技术。它是将物理性质、能量传输机制截然不同的两种热源复合在一起,同时作用在同一个加工位置,既充分发挥了各自的优势,又相互弥补了各自的不足,从而形成一种高效的焊接热源。激光电弧复合热源焊接以高焊速,大熔深,焊接稳定性强,焊件装备要求低等优点,受到焊接领域的广泛关注。

激光+双电弧复合热源焊接是在激光焊与双丝焊的基础上将复合焊的理念加以拓展,开发出的一种新型的焊接加工技术,与激光电弧复合热源焊接相比,其间隙适应性更好,焊接速度和熔敷效率都得到进一步提高,是一种具有发展潜力的复合焊接工艺。

消除或抑制焊接缺陷,提高接头性能,是激光+双电弧复合热源焊接推广应用的首要条件。激光+双电弧复合热源焊接过程复杂,焊接参数匹配不合理会使整个焊接过程热场、力场、流场、电场、磁场及热源的耦合机制发生变化,进而影响熔滴过渡、焊缝成形和微观组织。因此,了解激光与双电弧的相互作用方式及作用机理,对进一步研究激光+双电弧复合焊接方法工艺具有指导性意义。由于激光+双电弧复合热源焊接的研究工作尚处于起步阶段,目前尚缺少这方面的系统研究。本书综合国内外相关研究工作的成果,以YAG激光+脉冲双丝MIG复合焊接为例,详细系统地研究了激光+双电弧复合热源焊接的工艺特点及热源耦合机制,从而为激光+双电弧复合热源焊接过程控制、参数优化及内部物理机制的进一步深入研究提供理论基础和技术支持,同时也对其他类型的多热源焊接技术及方法的研究提供借鉴和参考。

全书共7章,第1章简要介绍了激光焊、激光+电弧复合焊,以

及双丝焊的基本原理、特点及研究进展,进而提出激光+双电弧复合热源焊接方法。第2章主要介绍了试验材料,试验方法及复合热源的一体化操作系统,包括编译控制软件实现高速摄像图片、光谱信号、电信号的同步采集。第3章详细阐述了YAG激光+双MIG电弧复合热源焊接过程中激光与双脉冲MIG电弧等离子体的耦合机制。基于电磁场理论,采用光谱分析法和高速摄影系统及电信号采集系统等,从力和热能传导的角度研究不同电源模式下激光与两个电弧等离子体之间的相互作用机理及其对熔滴受力和熔滴过渡的影响。第4章针对单电源供电模式下经常出现的一种特殊的交替燃弧现象,分析其形成机理、影响因素及抑制措施。第5章研究分析了YAG激光+双MIG电弧复合焊接工艺,包括各种焊接参数(焊接速度、双丝间距、激光离焦量、激光功率等)对复合焊缝成形的影响,确定复合焊接最佳工艺参数区间,获得YAG激光增强MIG电弧的临界条件。第6章依据混沌理论和算法,从非线性角度对激光+双丝脉冲MIG复合焊接过程的电流信号进行了最大Lyapunov指数(LLE)计算,旨在为激光+双丝脉冲MIG复合焊接过程稳定性提供判据,定量评估焊接过程稳定性。第7章是总结与展望。

本书综合考虑了实践性和理论性,适用于本科生、研究生的教学和工程技术人员参考。

本书在编写过程中,得到天津大学李桓教授的大力支持。同时,笔者引用和借鉴了部分专家学者的相关研究资料,在此一并表示感谢。感谢“江苏省品牌专业建设工程”(PPZY2015A027)、国家自然科学基金项目“激光+双MIG/双MAG电弧复合热源特性与耦合机理研究”(51175374)、江苏省自然科学基金项目“船用铝合金激光+双电弧复合焊接热源耦合机理及工艺研究”(BK20140509)的支持。

由于激光+双电弧复合热源焊接技术较新,可借鉴的资料较少,笔者水平有限,书中难免有疏漏和欠妥之处,敬请广大读者批评指正!

目 录

第1章 绪论 001

- 1.1 激光焊技术简介 001
- 1.2 激光+电弧复合焊接技术简介 003
 - 1.2.1 激光+电弧复合焊接原理 003
 - 1.2.2 激光电弧复合焊的特点 004
 - 1.2.3 热源类型及复合方式 008
 - 1.2.4 激光+电弧复合焊接在工业中的应用 009
- 1.3 双弧气体保护焊 011
- 1.4 激光+双MIG/MAG复合焊接方法的提出 013

第2章 激光双电弧复合热源焊接设备及方法介绍 015

- 2.1 试验材料 015
- 2.2 YAG激光+脉冲双MIG电弧复合焊接与信息采集系统 015
 - 2.2.1 YAG激光+脉冲双MIG电弧复合焊接系统 016
 - 2.2.2 电弧等离子体及熔滴过渡的高速摄像采集系统 020
 - 2.2.3 电弧等离子体光谱采集 021
 - 2.2.4 焊接电流、电压采集 023
- 2.3 同步采集系统的原理 024
 - 2.3.1 同步触发信号产生程序设计 024
 - 2.3.2 同步触发信号产生程序的主要函数和控件 026

2.3.3 采集软件前面板 027

第3章 YAG 激光 + 双 MIG 电弧复合热源耦合机理研究 029

3.1 光谱分析的基本理论 030

3.1.1 电弧光谱辐射强度定义 030

3.1.2 电弧等离子体电子温度估算方法 032

3.1.3 电弧等离子体电子密度估算方法 035

3.2 YAG 激光与电弧的耦合机理研究 036

3.2.1 复合等离子体光谱诊断 036

3.2.2 激光吸引、压缩电弧作用机制 045

3.2.3 激光稳定电弧 047

3.2.4 激光对熔滴过渡和熔池形态的影响 050

3.3 YAG 激光 + 脉冲双 MIG 电弧复合焊接稳定性分析 057

3.4 本章小结 070

第4章 YAG 激光 + 双丝 MIG 复合焊交替燃弧行为研究 072

4.1 脉冲模式下焊接交替燃弧现象 072

4.2 交替燃弧周期的影响因素及变化规律 073

4.2.1 激光功率对交替燃弧周期的影响 073

4.2.2 双丝间距对交替燃弧周期的影响 075

4.2.3 电弧电压对交替燃弧周期的影响 077

4.2.4 送丝速度对交替燃弧周期的影响 079

4.3 交替燃弧现象的形成机制 079

4.4 本章小结 084

第5章 YAG 激光 + 脉冲双 MIG 电弧复合焊接工艺研究 085

5.1 YAG 激光 + 脉冲双 MIG 复合焊接参数对焊缝成形的影响 085

5.1.1 激光功率对平板表面堆焊焊缝熔深、熔宽的影响 085

5.1.2	激光离焦量对平板表面堆焊焊缝熔深、熔宽的影响	086
5.1.3	焊接速度对平板表面堆焊焊缝熔深、熔宽的影响	087
5.1.4	双丝间距对平板表面堆焊焊缝熔深、熔宽的影响	088
5.1.5	焊枪倾角对平板表面堆焊焊缝熔深、熔宽的影响	089
5.2	YAG 激光对焊接熔池流动的影响	090
5.3	YAG 激光对焊缝表面成形的影响	091
5.4	YAG 激光 + 双 MIG 电弧复合焊接微观组织	093
5.5	本章小结	094
第 6 章	基于非线性理论的 YAG 激光 + 脉冲双 MIG 电弧复合焊接过程稳定性研究	096
6.1	理论基础	097
6.2	不同工艺参数下的 LLE 计算与分析	098
6.2.1	不同送丝速度下的 LLE 计算与分析	098
6.2.2	不同激光功率下的 LLE 计算与分析	101
6.2.3	不同双丝间距下的 LLE 计算与分析	104
6.3	本章小结	108
第 7 章	总结与展望	109
参考文献		112

第 1 章 绪论

随着交通运输、航空航天、海洋工程等工业的蓬勃发展,焊接技术也有了长足的进步。在保证焊接质量的同时,如何提高焊接生产效率,降低焊接成本,实现高效、优质的焊接满足生产的需要,是焊接生产面临的重要任务。本章将着重介绍激光焊接、激光复合焊、双弧气保护焊的基本原理、工业应用及研究进展。

1.1 激光焊技术简介

激光焊是一种新型的焊接方式,它利用高能量的聚焦激光束对材料进行局部加热,能量通过热传导向材料的内部扩散,使工件熔化,形成特定熔池。激光焊接主要用于薄壁零件、精密零件的焊接,可实现对焊、点焊、叠焊、密封焊等,具有加热集中、焊接速度快、深宽比大、变形小、焊缝美观、焊缝机械性能好、定位精确等优点,是最容易实现自动化、智能化加工的焊接技术。激光几乎可以焊接所有的金属材料及塑料、玻璃等非金属材料,并以其卓越的综合优势,已经广泛应用于汽车、航空航天、核电、造船及石油管道、电力、冶金、轻工业等领域,被认为是 21 世纪最具有前景的焊接方法之一。

常用的激光器主要有 CO_2 激光器、固体激光器(Nd:YAG)和光纤激光器。激光能量被材料吸收后在光热效应的作用下转化为热能。不同的激光功率密度将会引起材料产生不同的物态变化。激光焊接有两种基本模式:激光热导焊和激光深熔焊。两者的传热过程、焊缝成形机制、工艺特点和应用范围等都有很大

区别。

(1) 激光热导焊模式

这种模式的激光功率密度在 $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 范围,激光能量被材料表层所吸收,依靠热传导向工件内部进行能量传递。材料表面温度持续升高,但最高只能达到材料沸点,否则材料将被汽化形成凹坑,稳定的热导焊过程将受到破坏。这种焊接方式形成的焊缝浅而宽。图 1-1 为激光热导焊的熔化过程示意图。

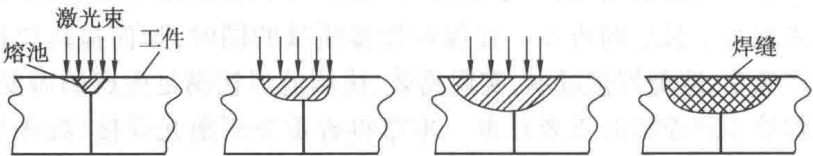


图 1-1 激光热导焊的熔化过程示意图

由于在这种焊接模式下金属表面对激光的反射率高,焊接热效率较低,但其焊接过程稳定,不易产生焊接缺陷。热传导焊主要用于薄板的焊接,尤其是微细部件的精密加工。

(2) 激光深熔焊(激光小孔焊)模式

当激光功率密度大于 10^5 W/cm^2 时,材料表面吸收激光能量后迅速熔化至汽化,熔融金属在蒸汽反冲压力作用下被抛出,激光作用处的熔池下凹形成小坑;激光束直接作用坑底,高压蒸汽不断从坑底向外喷发,从而使小孔进一步加深,直至小孔内蒸汽压力与液体金属的表面张力和重力平衡。小孔随着激光束沿焊接方向移动,小孔前方的熔融金属绕过小孔向后流动,最终凝固形成焊缝,如图 1-2 所示。激光深熔焊的本质特征是“小孔效应”的产生。这种焊接模式可以获得熔宽比较大的焊缝。在机械制造领域,除了微薄的零件外,均采用深熔焊模式。

随着光束质量的不断提高与激光焊接工艺的日益成熟,激光焊接技术越来越多地用来替代传统的连接方法,以实现减重、高效、高质的焊接制造。

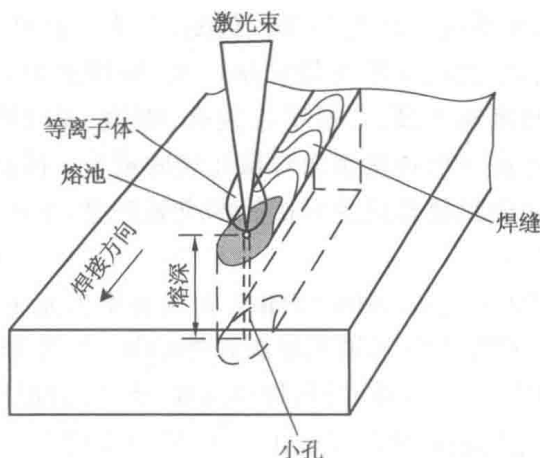


图 1-2 激光深熔焊过程示意图

航空业,欧洲空中客车公司(以下简称“空客公司”)采用双侧激光同步焊接技术替代铆接进行铝合金机身壁板的焊接,成功减重 18%,约降低成本 25%,同时生产效率得到数十倍的提升。由于不存在连接间隙,接头的疲劳性能及抗腐蚀性能也有一定程度的提升。这一崭新的连接工艺在未来的焊接技术革新和节约制造周期方面表现出巨大的发展潜力及应用前景。目前,空客公司已成功将机身壁板结构双侧激光同步焊接技术应用到 A318/A340/A380 等型号机身下壁板的批量化加工制造过程中。与此同时,空客座椅导轨上的钛-铝复合结构采用激光熔钎焊技术制造;美国通用电气公司成功实现了发动机导向叶片组件的激光焊接,有效地解决了镍基合金零件激光焊接变形与裂纹问题,并用 6 kW 的 CO_2 激光设备焊接喷气发动机燃烧室衬套。

1.2 激光+电弧复合焊接技术简介

1.2.1 激光+电弧复合焊接原理

虽然激光焊接具有诸多优点,例如,能量密度高,深宽比大,热影响区小,焊接变形小,焊接效率高,重复性好,光束可柔性传

输,精细聚焦和系统集成度高等。但是,激光焊接技术仍存在一些局限性,例如,大功率激光器价格昂贵,搭接能力差、对工件坡口加工装配精度要求高,容易产生气孔、咬边、裂纹等焊接缺陷;对铝、铜、金等高反射性的金属焊接比较困难等。因此,以激光为中心的激光 + 电弧复合热源焊接技术应运而生,并在近几年得到快速发展。

20 世纪 80 年代初,英国 Steen 等首次提出激光 + 电弧复合热源焊接技术。研究人员采用钨极氩弧焊(TIG)电弧旁轴辅助 CO₂ 激光(最大输出功率 2 kW)进行焊接试验,将这两种具有不同物理性质、能量传输机制的热源复合在一起,同时作用于工件的同一位置。焊接过程中,激光与电弧相互作用,既充分发挥了各自的优势,又弥补了各自的不足。激光吸引、压缩电弧,减小了电弧的电压,增大了电弧的电流密度,从而增加焊缝熔深,同时增强焊接过程的稳定性;电弧的加入,降低了激光焊接对工件装配精度的要求,同时提高工件对激光能量的吸收率。激光与电弧的复合形成了一种新的高效焊接热源,其复合焊接原理示意图如图 1-3 所示。

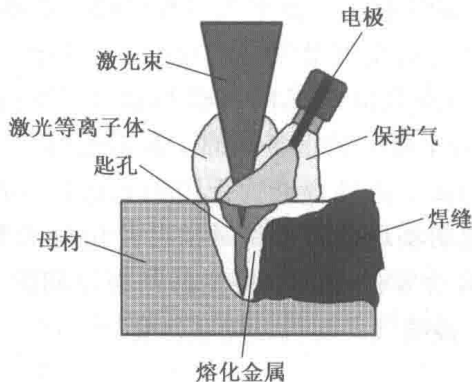


图 1-3 激光复合焊原理示意图

1.2.2 激光电弧复合焊的特点

如上文所述,激光电弧复合热源焊接并非两种焊接工艺的简单叠加,通过激光与电弧的相互耦合作用,与单纯激光焊接相比,激光电弧复合焊接具有以下特点:

(1) 电弧预热提高激光热效率

金属材料的光学特性与试验温度有密切的关系,当温度升高时,金属对激光的吸收率呈非线性增长,由于电弧的加热,使工件升温、熔化,激光束穿过电弧后直接作用于液态金属表面,大大降低了工件对红外激光(尤其是波长较大的 CO_2 激光)的反射率,提高了工件对激光的吸收。此外,由于电弧等离子体的温度和电离度相对较低,对光致等离子体有稀释作用,使得其电子密度减小,从而减小了光致等离子体对激光的吸收和折射,增加入射到工件表面的激光能量,但这种影响比较复杂,当焊接电流较大时,可能出现负作用。

(2) 增强工艺适应性

复合焊接过程中,电弧与焊丝的熔化增大了工件的加热区域,使得复合热源焊接降低了对间隙、对中度、错边的敏感性。对坡口间隙的搭桥能力增强是扩大激光电弧复合热源焊接应用范围的优势之一。激光电弧复合焊用于厚板窄间隙焊接,可以改善采用常规焊接方法常出现的咬边、凹陷、侧壁熔合不良等缺陷。当采用直流反接时,电弧可在激光焊接之前清洁焊缝表面,去除氧化膜,从而有利于焊接铝合金。同时电弧大的热作用范围、热影响区扩大,温度梯度减小,冷却速度降低,熔池凝固过程变得缓慢,可减少或消除气孔和裂纹的产生,这可以改善难熔难焊金属的焊接性。

(3) 改善焊缝成形

激光与电弧复合焊接所形成的较大熔池,可以改善熔化金属与固态母材的润湿性,消除焊缝咬边现象。而且激光和电弧的能量都可以单独调节,将两种热源适当配比可以获得不同的焊缝深宽比。同时复合焊接能够在接头间隙高达1.5 mm的情况下获得理想的焊缝成形。焊缝成形的改善避免了焊缝表面缺陷,使接头的延伸率和疲劳性能较单纯激光焊接有所改善。

(4) 提高焊接效率,降低成本

由于电弧的预热作用,提高了工件对激光能量的吸收率,从而增大了焊缝熔深。此外电弧热量也可经激光产生的小孔作用于工

件内部,使熔深进一步增大,图 1-4 所示是 YAG 激光 - 熔化极气体保护焊(GMA)复合焊的焊缝成形与同样焊接参数下的单一激光焊、GMA 焊进行的对比。结果表明,YAG 激光 - GMA 复合焊缝截面类似“酒杯”,相当于激光焊焊缝和 GMA 电弧焊焊缝的叠加,焊缝上部“杯体”由电弧热熔化母材形成,焊丝熔化添加的金属产生余高,焊缝熔宽主要由电弧焊参数决定;下部“杯脚”的指状焊缝由小孔效应所产生,具有激光深熔焊的特点。

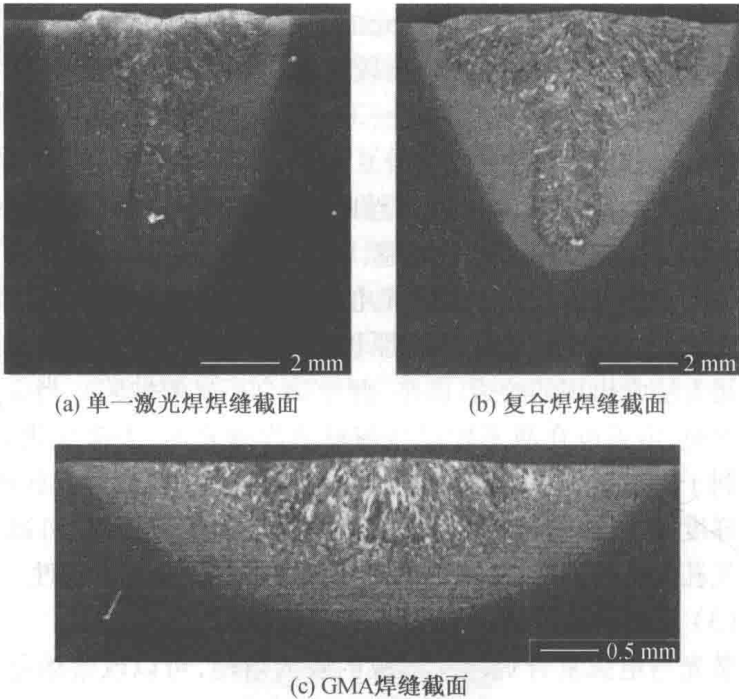
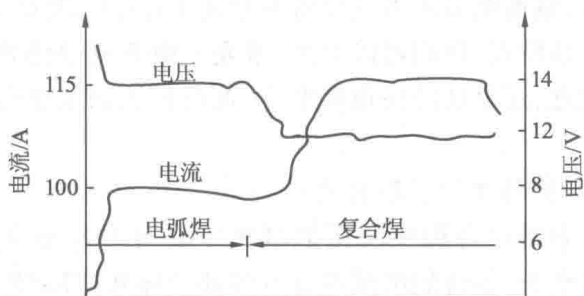


图 1-4 单一激光焊、复合焊与 GMA 焊缝截面比较

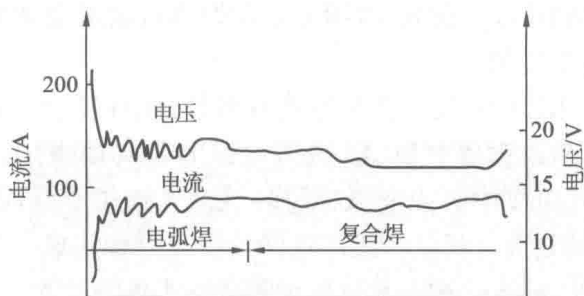
(5) 改善焊接过程稳定性

电弧焊接容易受到各种环境因素的影响而导致工艺过程剧烈波动,尤其是高速焊接中,电弧阳极或阴极斑点的剧烈跳跃会造成工艺极不稳定并伴随咬边、驼峰等焊缝缺陷。激光加入后,由于激光能量密度极高,焊接过程中会引起金属蒸发,在工件上方形成等离子体云,从而为电弧提供良好的导电通道,对电弧有强烈的吸

引和压缩作用,这可以减小引弧压力,降低场强,增强电弧稳定性。激光减小电弧电阻率,提高电弧稳定性的作用可以在图 1-5 中电弧电流电压数据中体现出来。图 1-5a 显示在以 22.5 mm/s 的速度焊接 3.0 mm 厚的低碳钢板时,激光的加入使得电弧弧柱电阻减小。图 1-5b 显示在以 45.0 mm/s 的速度焊接 3.0 mm 厚的低碳钢板时,激光的加入使得不稳定电弧变得稳定。



(a) 激光减小电弧电阻率



(b) 激光稳定电弧电压、电流特性

图 1-5 弧焊与复合焊的电流、电压特性

激光等离子体还能够通过激光、电弧相互作用提高电弧的电离程度,稳定和压缩电弧,提高工艺稳定性。对于电弧焊接,当焊接速度超过 2 m/min 时,就不能够形成稳定的电弧;而与激光复合实施焊接时,即使焊接速度提高到 10 m/min,电弧仍然被牢牢地固定在激光焊接所形成的小孔处。当激光和 TIG 复合焊接时,激光等离子体使得电弧燃烧稳定并吸引电弧,在高速焊接时不易发生电弧漂移或拉断现象。当激光和 MIG 复合焊接时,激光和电弧之