

文章编号: 1001-3806(2015)02-0259-07

## 激光-电弧复合焊接及应用于车身制造的进展

宋新华<sup>1,2</sup>, 金湘中<sup>2\*</sup>, 陈胜迁<sup>1</sup>, 袁江<sup>1,2</sup>, 张明军<sup>2</sup>

(1. 张家界航空工业职业技术学院 航空制造工程系, 张家界 427000; 2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

**摘要:** 激光-电弧复合焊接技术充分集成了激光焊接和电弧焊接两种工艺的的优点, 是一种新型优质的焊接技术, 具有良好的工业应用前景。介绍了激光-电弧复合焊接的特点和激光与电弧的相互作用机制; 总结了常见激光-电弧复合焊接技术的研究进展; 最后对激光-电弧复合焊接技术在汽车车身制造中的应用情况进行了概述。

**关键词:** 激光技术; 复合焊接; 研究进展; 汽车车身

**中图分类号:** TG456.7      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.024

### Progress of laser-arc hybrid welding and its applications in automotive body manufacture

SONG Xinhua<sup>1,2</sup>, JIN Xiangzhong<sup>2</sup>, CHEN Shengqian<sup>1</sup>, YUAN Jiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Mingjun<sup>2</sup>

(1. Department of Aerospace Engineering, Zhangjiajie Institute of Aeronautical Engineering, Zhangjiajie 427000, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Laser-arc hybrid welding, integrating the advantages of laser welding process and arc welding, is a new, high-quality welding technology which can be widely used in industry. Firstly, the characteristics of laser-arc hybrid welding, and laser-arc interaction were introduced. Secondly, the research progress of the general laser-arc hybrid welding technologies was reviewed. Finally, the applications of laser-arc hybrid welding technologies in automotive body manufacture were described.

**Key words:** laser technique; hybrid welding; research progress; automotive body

## 引言

激光焊接设备一次性投入较大、接头装夹精度要求极高等问题, 这也使得激光焊接技术在推广应用上受到一定限制。20世纪70年代末, STEEN 和 EBOO 首先提出了激光与电弧复合焊接技术的概念, 将 CO<sub>2</sub> 激光和钨极氩弧焊 (tungsten inert gas, TIG) 两种热源复合实现了激光-TIG 电弧复合焊接<sup>[1-2]</sup>。激光-电弧复合焊接技术充分集成了激光焊接和电弧焊接的优点, 具有工艺稳定性高、桥接间隙大、材料适应性广等优势, 是一种新型优质的焊接技

术。激光-电弧复合焊接技术也成为国内外学者的研究热点之一<sup>[3-8]</sup>。至今已发展为多种复合焊接方法, 包括激光-TIG、激光-熔化极气体保护电弧焊 (metal inert gas/metal active gas, MIG/MAG)、激光-等离子弧焊 (plasma arc welding, PAW) 和激光-埋弧焊 (submerged arc welding, SAW) 以及激光-双电弧等, 广泛应用于汽车、船舶、航空、重型机械、石油管道、钢铁等国民经济支柱产业<sup>[9-11]</sup>。

本文中结合国内外激光-电弧复合焊接的最新研究现状, 首先, 对激光-电弧复合焊接的特点和激光与电弧的相互作用进行介绍, 其次, 对激光-电弧复合焊接技术及其在汽车车身制造中应用的最新研究进展进行概述。

## 1 激光-电弧复合焊接技术的特点

激光-电弧复合焊接过程示意图如图1所示, 焊接时激光热源和电弧热源共同作用于同一位置, 其

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50875079); 湖南省自然科学基金资助项目 (09JJ3088)

作者简介: 宋新华 (1980-), 男, 硕士, 研究方向为激光焊接技术。

\* 通讯联系人。E-mail: jin9000xz@hotmail.com

收稿日期: 2014-01-16; 收到修改稿日期: 2014-04-15

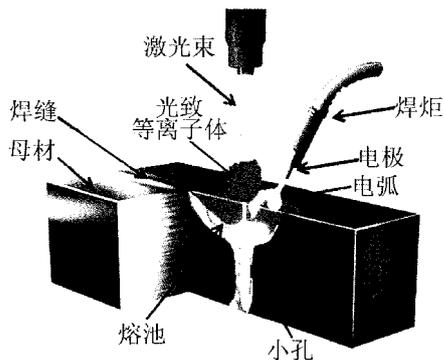


图1 激光-电弧复合焊接示意图

中常用的激光束热源包括 CO<sub>2</sub>、YAG、光纤、碟片和半导体激光等,电弧热源包括 TIG、MIG/MAG、PAW 和 SAW 等。相关研究发现<sup>[4-5,12]</sup>,复合焊接不是激光束与电弧两种热源简单的叠加,而是通过两种热源之间的相互作用和形成了一种新的复合热源。与激光或电弧单一热源焊接相比,激光束与电弧之间的相互作用使得复合热源的焊接特性较产生了显著变化,如光致等离子体特征、小孔稳定性、电弧稳定性、弧柱面积等,最终表现在复合焊接接头的焊缝成形、微观组织和力学性能等特性不同于单一热源焊接接头。图2为同等条件下电弧焊接、激光焊接和复合焊接焊缝截面图。激光-电弧复合焊接比激光自熔焊接或电弧焊接具有更强的适应性,焊缝成型

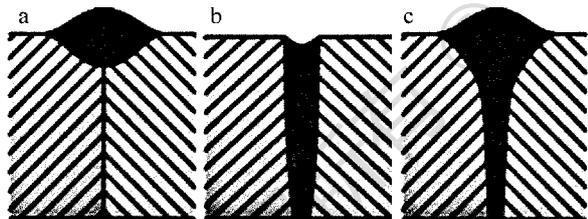


图2 电弧焊接、激光焊接和复合焊接焊缝截面成型

表1 电弧焊接、激光焊接和复合焊接对比

	电弧焊接	激光焊接	激光-电弧复合焊接
焊缝截面成形	图2a	图2b	图2c
桥接能力	好	差	好
焊接变形	大	小	小
残余应力	小	大	大(相对于电弧焊)
生产效率	低	高	高
裂纹敏感度	高(凝固裂纹)	高(脆性相形成)	低
气孔率	低	高	低
焊接熔深	浅 (厚板多道焊接)	高(厚板 单道焊接)	高(厚板单道焊接; 超厚板多道焊接)
稳定性	高速焊接不稳定	小孔不稳定	稳定
能量转换效率	低	高	高
高反射材料	可焊	难焊	可焊

性更好<sup>[9]</sup>。表1中列出了电弧焊接、激光焊接和激光-电弧复合焊接工艺技术的主要特点差异。由表1可知,激光-电弧复合焊接充分利用了激光和电弧两种热源的优势,同时又弥补了两种热源的不足,产生了“1+1>2”的协同效益。

## 2 激光与电弧的相互作用

激光与电弧的相互作用是一个极其复杂的物理过程。高能量密度激光烧蚀材料形成的金属蒸汽羽对电弧等离子体的导电率和导热率以及弧柱行为影响很大。两种热源的相互作用对焊接接头的性能具有重要影响<sup>[6,13]</sup>。

通常地,激光-电弧复合焊接过程中高功率激光直接辐照材料表面,形成深熔小孔,激光能量通过激光束在小孔内部的多重反射进行吸收<sup>[14]</sup>。从而光致等离子体在高能量密度激光与金属蒸汽和保护气体相互作用下而形成。光致等离子体吸收部分激光能量<sup>[15]</sup>。同时,电弧与周围空气之间的相互作用会产生电弧等离子体。激光束穿过电弧等离子体会发生能量衰减<sup>[5-6]</sup>。

激光-电弧复合焊接过程中,电弧发生收缩,即电弧宽度几乎与激光束直径相同<sup>[2,6]</sup>。这是由于光致等离子体的存在导致弧阻和半径减小。图3所示为激光存在时低弧阻和电弧稳定性的电弧电流和电压变化曲线<sup>[2]</sup>。图3a所示为以22.5mm/s速率焊接3mm厚碳钢时弧阻变化曲线,显然当激光存在时,弧阻逐渐减小,并稳定在一定数值。图3b所示为45mm/s速率焊接2mm厚碳钢时不稳定电弧的稳定过程。光致等离子体对电弧电阻率和稳定性的影响可从两方面进行说明,一方面,电弧等离子体会

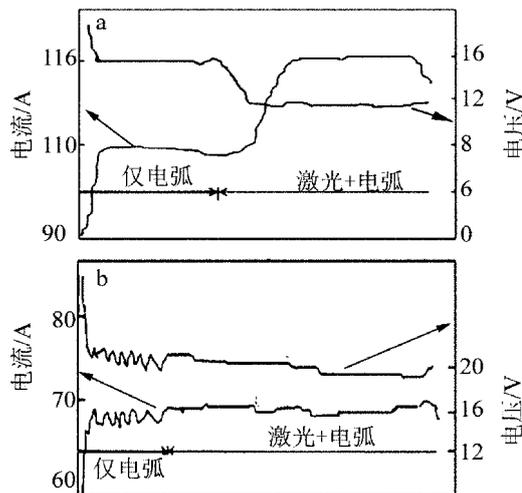


图3 激光-电弧复合焊接激光对电弧电流和电压特性的影响<sup>[2]</sup>

吸收少部分激光能量,使得电弧等离子体进一步电离,其电阻减小<sup>[6,16]</sup>。另一方面,激光辐射的局部位置材料剧烈蒸发产生的金属蒸汽,传播到电弧等离子体中。然而,与保护气体相比,金属原子的电离能小很多,从而使得整个电弧等离子体的有效电离能减小,最后获得导电性更好更稳定的等离子体通道。金属蒸汽可以增强电流传导并降低电弧电压<sup>[17]</sup>。由于电弧路径是沿着最小电阻的,所以电弧会发生弯曲,在很靠近小孔的位置形成弧根。从图 3a 可以看出,当激光存在时,电弧电压减小,这可能是由于激光辐照下产生的金属蒸汽所致。

关于激光束与电弧等离子体相互作用:一方面,电弧等离子体辐射光对母材产生预热效果,从而增大材料对激光的吸收效率,对于波长较长的 CO<sub>2</sub> 激光预热作用更明显;另一方面,由于电弧等离子体削弱了光致电离等离子体,使得光致电离等离子体对入射激光的散焦效应减弱,从而入射激光可以增强电弧等离子体的稳定性<sup>[2,6]</sup>。

通常地,焊接电弧中心相对于环境的温差越大,电弧收缩越强烈。因此,当激光和电弧距离较小时,电弧中心温度大大增大,而环境温度不变,从而可以改善弧焊焊接性能。同理,激光与焊接电弧的相互作用也可以改善激光焊接特性。对于高反材料,激光难以直接被吸收。然而,电弧可以对焊接工件表面进行加热,从而使得激光束能量被工件吸收<sup>[18]</sup>。激光-电弧复合焊接过程中,电弧对激光束的影响与激光波长有关,波长长,容易产生光致等离子体,反之,材料蒸发剧烈而产生金属蒸汽。激光与电弧的相互作用机理与激光波长相关,加之两者相互作用过程的复杂性,因此,关于激光与电弧相互作用的机理研究有待进一步研究。

### 3 激光-电弧复合焊接技术的研究进展

#### 3.1 激光-MIG/MAG 电弧复合焊接技术

相对于单一的激光焊接,激光-MIG/MAG 电弧复合焊接通过填充焊丝材料熔池增大,从而允许较大的装配公差,减少待焊接头加工和装夹的精度要求,使得这一技术在实际工业生产中获得良好的应用。

近年来,由欧洲煤炭和钢铁研究基金资助,包括德国、丹麦和英国等国家的科研人员开展了结构钢经(HYBLAS)经济和安全激光复合焊接项目,分别采用 20kW CO<sub>2</sub> 激光器和 7.2kW Nd:YAG 激光器,

运用激光-MAG 电弧复合焊接厚钢板<sup>[19]</sup>。WEBSTER 等人<sup>[20]</sup>采用 20kW CO<sub>2</sub> 激光器实现了 15mm ~ 25mm 厚板单道激光-MAG 电弧复合焊接,如图 4 所示。同时研究了激光参量、送丝速率以及不同坡口形式等对焊接质量的影响。

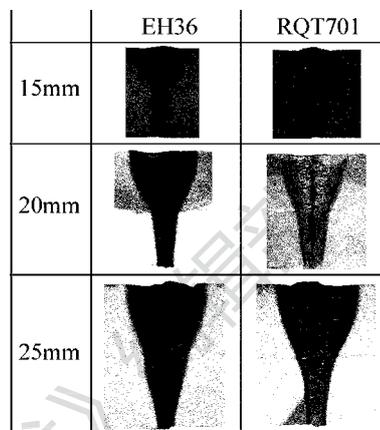


图 4 厚板单道复合焊接焊缝截面图<sup>[20]</sup>

德国联邦材料试验研究院 WESTIN 等人采用激光-GMAW 电弧复合焊接实现了 13.5mm 厚双相不锈钢单道焊接连接,并对复合焊接接头的显微组织和力学性能进行了分析<sup>[21]</sup>。瑞典吕勒奥理工大学 KAPLAN 教授所在的研究团队对采用高速摄影技术对激光-MAG 电弧复合焊接咬边缺陷的产生机理进行了研究,并对激光-MAG 电弧复合焊接 4mm 厚钢板的稳定性和破口组合形状对熔池流动和焊接质量的影响进行了研究<sup>[22-24]</sup>。美国海军采用激光-MIG 电弧复合焊接船体结构件<sup>[25]</sup>,所需时间比传统电弧焊接节省 2 ~ 3 倍,最大桥接间隙为 1.14mm。2011 年,美国 GE 公司开发了 20kW 光纤激光电弧复合焊接系统<sup>[26]</sup>。激光电弧复合焊接可以一次焊接厚度超过 1.27cm 的钢板。相比过去传统的焊接方法,使用激光电弧复合焊接技术焊接 USS Saratoga 航母,可节省约 800t 焊接材料和 80% 焊接工时。GE 公司正在积极探索将这一技术应用于油气管道、发电、铁路等基础设施焊接制造<sup>[26]</sup>。ONO 等人研发了激光-MAG 电弧焊接系统,用于车用镀锌板激光搭接焊接<sup>[4]</sup>。SUGA 等人<sup>[27]</sup>采用激光-MAG 电弧复合焊接技术实现了 6mm ~ 12mm 厚 HT780 钢板的单道焊接连接,对激光与电弧的不同位置布置进行了研究。最近,日本 NADEX 激光研发中心材料加工研究实验室采购了全球首台 100kW 光纤激光器应用于 300mm 厚板复合焊接<sup>[28]</sup>。

国内 LIN 研究团队<sup>[29-31]</sup>对激光熔化极电弧复

合焊接技术进行了大量研究并在工程应用中得到推广。ZENG 研究团队<sup>[32-34]</sup>对激光-MIG 电弧焊接的工艺和机理开展了大量研究,在两种热源相互作用机理、焊接工艺、接头性能以及焊接质量控制等方面开展了研究,并提出了激光-电弧复合焊接热源相互作用定量分析方法。WANG<sup>[35]</sup>通过高速摄像和光谱分析手段,对光纤激光-MIG 复合焊接铝合金时等离子体行为进行了研究,提出了一种复合等离子体模型,研究了光致等离子体与电弧的相互作用机理。LIU 研究团队<sup>[36-37]</sup>研究了低功率脉冲 YAG 激光-MAG 复合焊接。结果表明,在脉冲 YAG 激光作用下电弧形态发生了变化,电弧根部被吸引而压缩现象显著。LIU 等人<sup>[38-39]</sup>对激光-MAG 复合焊接工艺参量对焊缝成形和熔滴过渡影响进行了研究。

### 3.2 激光-TIG 电弧复合焊接技术

当年 STEEN 教授等人首次提出激光电弧复合焊接概念时采用的就是激光-TIG 电弧复合方式。激光-TIG 电弧同向复合焊接 0.8mm 厚纯钛板时,焊接速率提高了 2 倍;激光-TIG 电弧反向复合焊接 0.2mm 马口铁时,焊接速率提高了 4 倍<sup>[1-2]</sup>。DILTNEY 等人<sup>[40]</sup>研究发现 TIG 电弧加热区域,激光能量的吸收率增大。ARIAS 等人<sup>[41]</sup>采用激光-TIG 电弧复合焊接技术实现了 0.4mm~0.8mm 不锈钢板对接连接,速率高达 15m/min。NAITO 等人<sup>[42]</sup>采用 X 射线透射成像仪和高速相机研究了 YAG 激光-TIG 电弧复合焊接 304 不锈钢电弧等离子体和光致等离子体的行为,并对保护气氛对焊缝成形的影响,以及熔深特性和气孔防止机理进行了较为系统的研究。

近年来,国内学者对激光-TIG 电弧复合焊接的进行了大量研究。CHEN 等人<sup>[43-44]</sup>较早对不锈钢、铝合金、镁合金和镀锌板等材料的激光-TIG 电弧复合焊接激光与电弧相互作用机理和工艺技术进行了研究。LIU 等人<sup>[45-46]</sup>对镁合金及其与铝合金和碳钢异种材料激光-TIG 电弧复合焊接进行了研究,结果表明,复合焊接可以增大熔深,焊缝成形好且力学性能满足要求。XIAO 等人<sup>[47]</sup>系统研究了复合焊接时激光-TIG 电弧相互作用后的激光特性及电弧特性。GAO 和 YAN 等人<sup>[33-34]</sup>对激光-TIG 电弧复合焊接超细晶粒钢和不锈钢进行了研究。

综上所述,国外对激光-电弧复合焊接的研究投入较大,工业应用推广效果显著,国内近几年对激光-电弧复合焊接的研究有所增多,在工业中的应用推广需要进一步加强。近年来,随着高功率高光束

质量新型固体激光器(光纤激光器、盘片激光器、半导体激光器等)的面世,使得厚板激光电弧复合焊接成为可能,高功率(万瓦级)固体激光-电弧复合焊接厚板过程中蕴含的新现象和新机理亟待研究。

## 4 激光-电弧复合焊接技术在汽车车身制造中的应用

现代社会对汽车节能减排的要求提高,汽车车身轻量化设计采用了更多的轻质材料如镀锌高强度钢板和铝合金等。目前,车用镀锌高强度钢板和铝合金材料主要采用激光焊接工艺。对于镀锌高强度钢激光对接焊接,要求对接坡口装配间隙严格,难以在工业批量化生产,而激光搭接焊接存在锌蒸发导致的焊接缺陷问题<sup>[48]</sup>。由于铝合金对激光反射率较高,需要较大的激光功率进行焊接,且伴随强化元素的蒸发损失,而导致强度降低<sup>[49]</sup>。另外,还存在设备成本高和前期准备工序要求严格等问题。激光-电弧复合焊接技术可以解决上述问题。

美国通用汽车公司中国科学研究院 YANG 采用激光-TIG 电弧复合焊接技术对镀锌高强度钢板搭接接头实现了无间隙焊接,焊缝成型如图 5a 焊缝所示<sup>[50]</sup>。具体实施方式是,TIG 电弧在激光束前面对搭接镀锌高强度钢板进行预热,使搭接层中的锌层熔化,从而在紧随的激光焊接过程中锌蒸汽大大减少。图中左侧焊缝为单纯激光搭接焊镀锌钢板的成型效果,可以看出焊缝表面和内部明显存在空洞,焊缝成型和性能大大降低。

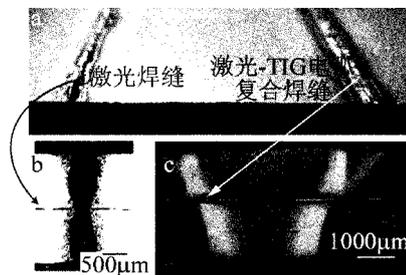


图 5 镀锌板搭接焊

德国大众汽车公司辉腾(Phaeton)系列车型的所有车门都采用了冲压、铸件和挤压成形的铝件,且应用了激光-MIG 电弧复合焊接工艺技术,实际装车如图 6a 所示<sup>[9,51]</sup>。图 6b 所示为激光-MIG 电弧复合焊接头。整个车门共计 48 条激光-电弧复合焊缝,长度为 3570mm。另外,激光焊接焊缝 11 条,长度为 1030mm, MIG 电弧焊接焊缝 7 条,长度仅为 380mm。车门内板焊点示意图如图 6c 所示。

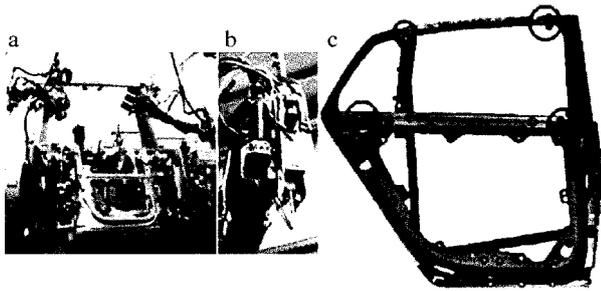


图 6 大众辉腾车门激光-电弧复合焊接<sup>[51]</sup>

a—夹具 b—复合焊头 c—车门内板焊点分布

另外,激光-MIG 电弧复合焊接技术还应用于全铝车身奥迪 A8 车型的制造,其车身侧顶梁具体位置分析如图 7 所示<sup>[9,51]</sup>。整个车身激光-MIG 电弧复合焊接焊缝长度共计 4500mm。奥迪公司激光焊接技术中心的负责人 HELTEN 先生高度评价:“激光与电弧两种焊接方法复合可以获得更好的焊接性能,从生产效率、成本、焊接质量及安全性等各方面来看,激光电弧复合焊接技术都突破了热连接工艺的局限”<sup>[52]</sup>。

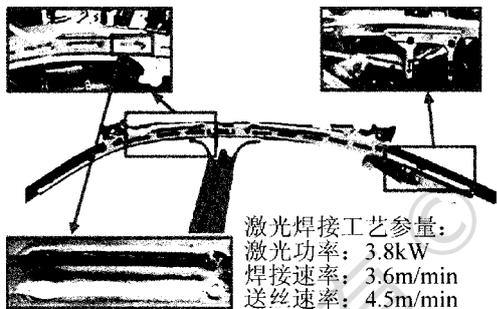


图 7 奥迪 A8 车顶与侧围激光电弧复合焊接<sup>[52]</sup>

德国不莱梅激光研究所<sup>[53]</sup>采用激光-MIG 电弧复合焊接车用钢板和铝合金板,焊接过程示意图如

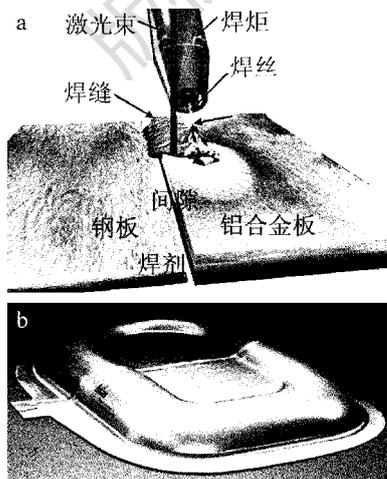


图 8 车用铝钢激光-MIG 电弧复合焊接<sup>[53]</sup>

a—焊接示意图 b—拼焊板冲压成形

图 8a 所示。同时与爱尔兰根纽伦堡大学合作对激光-MIG 电弧复合焊接车用铝合金和钢板异种材料拼焊板进行了研究。图 8b 为经深冲的铝合金与钢板异种材料拼焊板,冲压成形良好。国内 QIN 等人<sup>[54-55]</sup>对镀锌钢板和铝合金板异种金属激光-MIG 电弧熔钎焊接工艺和接头组织性能进行了研究。采用铝合金材料代替钢材是汽车车身轻量化的重要途径之一。一旦钢铝异种金属焊接连接的强度和可靠性得到保证,必将使得大量铝合金轻质材料应用于汽车车身。

## 5 结论

激光-电弧复合焊接具有激光焊的大熔深、高效率和电弧焊优良的桥接能力和高的填充金属熔敷效率,同时,又克服了激光焊接或电弧焊接都容易出现焊接缺陷,如裂纹、脆性相和气孔。激光与电弧的协同作用,产生了 1 + 1 > 2 的效果,焊接过程稳定性和可靠性得到了极大提高。近年来,随着轻质铝合金材料不断应用于汽车车身,激光-电弧复合焊接在汽车车身制造中的应用更加广泛。随着新型高亮度固体激光器的不断商业化,激光-电弧复合焊接的研究和推广将迎来新的机遇,然而,在两种热源复合焊接机理、厚板焊接和轻质合金材料焊接工艺技术等方面还有待进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] STEEN W M, EBOO M. Arc augmented laser welding [J]. Metal Construction, 1979, 11(7): 332-335.
- [2] STEEN W M. Arc augmented laser processing of materials [J]. Journal of Application Physics, 1980, 51(11): 5636-5641.
- [3] TUSEK J, SUBAN M. Hybrid welding with arc and laser beam [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 1999, 4(5): 308-311.
- [4] ONO M, SHINBO Y, YOSHITAKE A, et al. Development of laser-arc hybrid welding [J]. NKK Technology Review, 2002, 86(1): 8-12.
- [5] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laser hybrid welding [J]. Journal of Laser Applications, 2005, 17(1): 2-14.
- [6] HU B, DEN G. Laser induced stabilization of the welding arc [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(1): 76-81.
- [7] GAO M, ZENG X Y, YAN J. CO<sub>2</sub> laser-pulsed MAG hybrid welding of mild steel [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 498-500 (in Chinese).
- [8] CHEN Y B, LI L Q, WU L. Quantitative measurement of absorption and defocusing of laser beam by electric arc [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(3): 56-58 (in Chinese).
- [9] LI F. Application of laser hybrid welding and laser brazing in VW-

- Phaeton and Audi A8 [J]. *Machinist Metal Forming*, 2008(14): 31-34 (in Chinese).
- [10] JEFF D. Practical applications for hybrid laser welding [J]. *Welding Journal*, 2007, 86(10): 47-51.
- [11] YUAN X C, ZHAO H, WANG P P. Research and application of laser arc hybrid welding technology [J]. *Welding Technology*, 2010, 39(5): 2-7 (in Chinese).
- [12] CHEN Y B, LEI Z L, LI L Q, *et al.* Welding characteristics in different laser-TIG hybrid manners [J]. *China Welding*, 2004, 13(1): 41-45.
- [13] PAGE C J, DEVERMANN B J, BLUNDELL N. Plasma augmented laser welding and its applications [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2002, 7(1): 1-10.
- [14] JIN X, BERGER P, GRAF T. Multiple reflections and Fresnel absorption in an actual 3-D keyhole during deep penetration laser welding [J]. *Journal of Physics*, 2006, D39(21): 4703.
- [15] CHENG Y, JIN X, LI S, *et al.* Fresnel absorption and inverse bremsstrahlung absorption in an actual 3-D keyhole during deep penetration CO<sub>2</sub> laser welding of aluminum 6016 [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(5): 1426-1436.
- [16] RIBIC B, RAI R, DEBROY T. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in GTA/laser hybrid welding [J]. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2008, 13(8): 683-693.
- [17] RAYES M, WALZ C, SEPOLD G. The influence of various hybrid welding parameters on bead geometry [J]. *Welding Journal*, 2004, 83(5): 147-153.
- [18] SIEMROTH P, SCHEIBE H J. The method of laser-sustained arc ignition [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1990, 18(6): 911-916.
- [19] WEBSTER S. Hyblas: economical and safe laser hybrid welding of structural steel-final report [M]. Brussels, Belgium; Directorate-General for Research Information and Communication Unit European Commission, 2009;2-10.
- [20] WEBSTER S, KRISTENSEN J K, PETRING D. Joining of thick section steels using hybrid laser welding [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2008, 35(7): 496-504.
- [21] WESTIN E M, STELLING K, GUMENYUK A. Single-pass laser-GMA hybrid welding of 13.5mm thick duplex stainless steel [J]. *Welding in the World*, 2011, 55(1/2): 39-49.
- [22] NORMAN P M, KARLSSON J, KAPLAN A F H. Mechanisms forming undercuts during laser hybrid arc welding [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(1): 201-207.
- [23] MORADI M, GHOREISHI M, FROSTEVARG J, *et al.* An investigation on stability of laser hybrid arc welding [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(4): 481-487.
- [24] LAMAS J, KARLSSON J, NORMAN P, *et al.* The effect of fit-up geometry on melt flow and weld quality in laser hybrid welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 2013, 25(3): 032010.
- [25] DENNEY P E, FALLARA P M, BROWN L E. Hybrid laser weld development for shipbuilding applications [C]// *Proceedings of Ship Production Symposium and Expo*. Ypsilanti, Michigan, USA; Ship Production Symposium and Expo, 2002: 25-27.
- [26] PRATT D. GE unveils ultra powerful high-tech laser welding system [EB/OL]. (2011-4-14) [2014-01-12]. <http://www.genewscenter.com/content/Detail.aspx?ReleaseID=12278&NewsAreaID=2>.
- [27] SUGA T, MURAI Y, KOBASHI T, *et al.* Research on laser-arc hybrid welding of H1780 steel [J]. *Welding in the World*, 2012, 56(11/12): 105-118.
- [28] WALLACE J. Materials processing; 100kW fiber laser, power meter serve industry [J]. *Laser Focus World*, 2013, 49(12): 13-14.
- [29] LEI Z, QIN G L, LIN Sh Y, *et al.* Fusion-brazing joining for dissimilar metals between 5A02 aluminium alloy and zinc-coated steel based on laser-MIG hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 94-98 (in Chinese).
- [30] LIN Sh Y. Laser arc welding new technology and application [C]//*The Second Civil Aircraft Manufacturing Technology and Equipment Forum*. Beijing, China: Chinese Mechanical Engineering Society, 2010: 1-2 (in Chinese).
- [31] WANG W, LIN S Y, WANG X Y, *et al.* Double electric conduction mechanism of Nd:YAG laser-pulse MAG hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 50-59 (in Chinese).
- [32] GAO M, ZENG X Y, YAN J, *et al.* Heat sources interaction of laser-arc hybrid welding [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(5): 465-468 (in Chinese).
- [33] GAO M. Study on technology, mechanism and quality controlling of CO<sub>2</sub> laser-arc hybrid welding [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007: 124-125 (in Chinese).
- [34] YAN J. Study on Technology, Defects and joint quality by fiber laser- arc hybrid welding high strength aluminum alloys [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011: 25-102 (in Chinese).
- [35] WANG J. Study on the technology and plasma behaviour during the fiber laser and laser hybrid welding of aluminum alloy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012: 139-141 (in Chinese).
- [36] KANG L, HUANG R S, LIU L M, *et al.* Low-power YAG laser-MAG arc hybrid welding of stainless steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(11): 69-72 (in Chinese).
- [37] LIU L, HUANG R, SONG G, *et al.* Behavior and spectrum analysis of welding arc in low-power YAG-laser-MAG hybrid-welding process [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(4): 1937-1943.
- [38] LIU F D, ZHANG H, WANG Y Q, *et al.* Influence of area energy for welding seam and droplet transfer on hybrid laser-arc welding [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(14): 84-90 (in Chinese).
- [39] LIU F D, ZHANG H, DU S Y, *et al.* Influence of laser power on arc and droplet behaviors in droplets on CO<sub>2</sub> laser-MAG arc hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(4): 75-82 (in Chinese).
- [40] DILTHEY U, WIESSCHEMANN U. Perspectives offered by combining and coupling laser beam and arc welding [J]. *Welding International*, 2002, 16(9): 711-719.
- [41] ARIAS J L, ROMERO P, VANDEWYNCKELE A, *et al.* Laser-TIG hybrid welding of very thin austenitic stainless steel sheets [C] // *Proceedings of the 24th International Conference on Applications of Lasers and Electro-Optics*. Orlando, FL, USA: La-

- ser Institute of America, 2005: 104-107.
- [42] NAITO Y, MIZUTANI M, KATAYAMA S. Penetration characteristics in YAG laser and TIG arc hybrid welding, and arc and plasma/plume behaviour during welding. Welding phenomena in hybrid welding using YAG laser and TIG arc (First Report) [J]. *Welding International*, 2006, 20(10): 777-784.
- [43] CHEN Y B, CHEN J, LI L Q, *et al.* Properties of arc and weld in laser-TIG hybrid process [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 24(1): 55-56(in Chinese).
- [44] TAN C, LI L, CHEN Y, *et al.* Laser-tungsten inert gas hybrid welding of dissimilar metals AZ31B Mg alloys to Zn coated steel [J]. *Materials & Design*, 2013, 49: 766-773.
- [45] LIU L, CHEN M, LI C. Effect of electric arc on laser keyhole behavior based on direct observation during low power pulsed laser-arc hybrid welding process [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(10): 1153-1160.
- [46] LIU L M, YUAN S T, LI C B. Effect of relative location of laser beam and TIG arc in different hybrid welding modes [J]. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2012, 17(6): 441-446.
- [47] XIAO R Sh, WU S K. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(11): 1680-1685(in Chinese).
- [48] ZHANG Y, LI S C, JIN X Z, *et al.* Research on the key technology of laser welding of galvanized steel [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010(7): 37-45(in Chinese).
- [49] MEI L F, CHEN G Y, JIN X Z, *et al.* Study on fiber laser overlap-welding of automobile aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(8): 2091-2097(in Chinese).
- [50] YANG S, CARLSON B, KOVACEVIC R. Laser welding of high-strength galvanized steels in a gap-free lap joint configuration under different shielding conditions [J]. *Welding Journal*, 2011, 90(1): 8-18.
- [51] KUJANPÄÄ V. Short overview of laser applications in automotive manufacturing [C] // Pro-Factory Brokerage Meeting. Gothenburg, Sweden: EUREKA, 2008: 10-11.
- [52] STAUFER H, RUHRNOSSL M, MIESSBACHER G. Laser hybrid welding and laser brazing; state of the art in technology and practice by examples of Audi A8 and VW-Phaeton [C] // Proceedings of the Third International WLT Conference on Lasers in Manufacturing. Stuttgart, Germany: AT-Fachverlag, 2005: 203-208.
- [53] THOMY C, VOLLERTSEN F. Laser-MIG hybrid welding of aluminium to steel-effect of process parameters on joint properties [J]. *Welding in the World*, 2012, 56(5/6): 124-132.
- [54] QIN G L, SU Y H, WANG S J. Microstructures and properties of pulsed MIG arc brazeing-fusion welding joint of Al alloy and galvanized steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012, 48(8): 1018-1024.
- [55] LEI Z, QIN G L, LIN S Y, *et al.* Fusion-brazing joining for dissimilar metals between 5A02 aluminium alloy and zinc-coated steel based on laser-MIG hybrid welding [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 94-98.