

文章编号 1004-924X(2016)增-0280-07

## 钛合金厚板激光-电弧复合热源打底焊工艺

史吉鹏, 周彦彬, 刘黎明\*

(大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**针对航空钛合金厚板结构件打底焊时存在的自动化程度低, 焊缝成形难以控制, 生产效率低等制约行业发展的瓶颈问题, 采用低功率脉冲激光-TIG 复合热源焊接技术对 10 mm 厚钛合金板材进行了打底焊工艺及焊缝成形机理的试验研究。采用视觉图像监测技术对脉冲激光作用前后的等离子体行为和熔池状态变化进行了观察和分析。试验结果表明: 低功率脉冲激光-TIG 复合热源焊接时, 脉冲激光对 TIG 电弧有诱导增强作用的同时还对熔池流动与电弧热量分布有调控作用。将热源间距调到 3mm 时电弧压缩到激光作用点附近, 熔池在耦合电弧挖掘力的作用下向后流动促使熔池热量向后转移, 此时热源分布到熔池正、背面的热量使背面熔池受力平衡、稳定, 可获得成形良好焊缝, 其接头的屈服强度和抗拉强度分别为母材的 96.3% 和 95.8%, 能够满足使用要求。

**关键词:**激光-电弧复合焊; 钛合金厚板; 复合热源; 打底焊; 热量分布

**中图分类号:** TG456 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0280

## Root welding process in laser-TIG hybrid welding of titanium alloy thick plate

SHI Ji-peng, ZHOU Yan-bin, LIU Li-ming\*

(College of Materials Science and Engineering,  
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

\* Corresponding author, E-mail: liulm@dlut.edu.cn

**Abstract:** Aiming at the restrictions of lower degree of automation, difficult weld reform control and inefficiency in root welding of titanium alloy, a laser-arc hybrid welding technique was realized to fabricate a titanium alloy plate with thickness of 10 mm. The welding process and weld seam forming mechanism were investigated experimentally. During the interaction between pulsed laser with low power and TIG arc plasma, the plasma behaviors and molten pool state were monitored using a visual system. The result indicates that pulsed laser can not only improve the arc discharge, but also regulate the flow of the molten pool and heat distribution of TIG arc during the hybrid welding process. The arc was gathered nearby the acting point of laser with a distance between the two heat sources is 3 mm, where the molten pool was forced to flows backwards by the coupled arc bonding force and heat transfers backwards. Meanwhile the heat distributed in the front and back of the molten pool keeps the stress balanced and stable, resulting in a well surface appearance welding seam with yield strength of 96.3% and tensile strength of 95.8%.

收稿日期: 2016-05-20; 修订日期: 2016-06-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11375038)

**Key words:** laser-arc hybrid welding; titanium alloy thick plate; hybrid heat source; root welding; energy distribution

## 1 引言

钛合金因具有低密度、高比强度、高比刚度、好的耐蚀性、优良的耐热性等特征,而在航空航天业等领域中有着广阔的应用前景,特别适用于飞机、航天器的轻质外壳、蒙皮、骨架结构件及其它构件<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着钛合金制品的生产能力和技术水平的提升,以及航天器装备零件的体积逐渐增大、结构更加复杂,厚钛合金结构件在航空航天领域中的需求越来越多<sup>[3]</sup>。焊接技术作为结构件制造领域的共性技术,已经成为影响钛合金在装备制造领域推广应用的关键性技术<sup>[4]</sup>。众所周知,工业生产中厚板钛合金的焊接常采用多层多道焊技术来完成,而其中第一道打底焊的焊缝成形与性能会直接影响到最终的产品质量,特别是对一些复杂结构件,焊后受空间位置限制很难进行二次加工,焊缝形貌将直接影响产品的使用性和安全性。因此开发一种高效稳定、经济性好、用于厚板钛合金打底焊的方法对于推动厚板钛合金结构的应用有着重要意义<sup>[5-6]</sup>。

激光具有方向性好、传导容易、可达性好等特点<sup>[7-9]</sup>。激光-电弧复合热源是将激光与电弧两种物理特性、热源模式完全不同的两个热源复合在一起共同作用,形成了一种全新的焊接模式。该模式具有焊接速度快、热输入小、热量利用率高等优点<sup>[10]</sup>。目前,中厚板材的激光-电弧复合焊接已引起国内外学者的重视。熊俊等人对 5 mm 厚 TC4 钛合金进行激光-TIG 复合焊接,得到了成形良好、机械性能可靠的焊缝<sup>[11]</sup>。曹运明等人研究不同厚度钛合金激光-TIG 复合焊接的组织性能,发现其抗拉强度达到母材 95% 以上,且随着板厚增加,抗拉强度降低<sup>[12]</sup>。结合国内外研究现状可以发现,针对厚板激光-电弧复合焊的研究多集中

在钢铁材料<sup>[13-14]</sup>,虽然也偶有对厚板钛合金激光-电弧复合焊的研究,但多数是关于焊缝组织性能的<sup>[15]</sup>,而对焊缝成形的研究甚少。

本文采用低功率脉冲激光-TIG 复合焊技术(以下称复合热源)探索厚板钛合金打底焊接头的成形工艺。为了对复合热源打底焊的成形机理进行深入研究,采用视觉图像监测技术对脉冲激光作用前、后电弧等离子体行为以及熔池状态进行了采集,焊后测试了接头机械性能。最后,从理论上分析了复合热源焊接时加入的低功率脉冲激光在与电弧相互作用协同增强的同时还对电弧起到调节作用,通过控制打底焊时热源对正、背面熔池的热量分配来控制焊缝成形。

## 2 试验材料和试验方法

试验材料选取 10 mm 厚 TA15 钛合金板材进行对接冷填丝焊接试验,试件规格为 100 mm × 100 mm × 10 mm,开 60° V 形坡口并留有 2 mm 钝边(如图 1 所示)。焊丝选用直径为 1.2 mm 的 TA0-1,其母材与焊丝的化学成份如表 1 所示。焊前两小时内,先用砂纸打磨板材表面去除氧化膜,然后再用丙酮清洗板材表面及坡口,去除附着在表面的有机物以及灰尘。

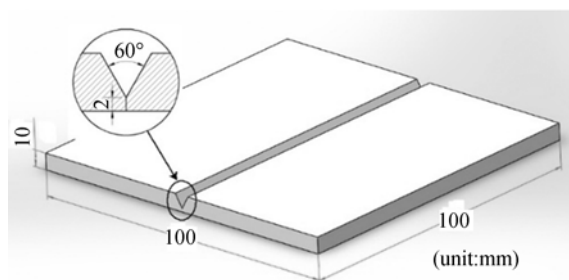


图 1 试件与坡口尺寸示意图

Fig. 1 Dimensions of specimen and shaped groove

表 1 母材及焊丝化学成份

Tab. 1 Chemical composition of base metal and filler metal

(wt%)

| 成份    | Al      | Zr      | Mo      | V       | C    | Fe   | H     | Si   | O    | N    | 其他  |
|-------|---------|---------|---------|---------|------|------|-------|------|------|------|-----|
| TA15  | 5.5-7.0 | 1.5-2.5 | 0.5-2.0 | 0.8-2.5 | 0.1  | 0.25 | 0.015 | 0.15 | 0.15 | 0.03 | 0.3 |
| TA0-1 | 0.2     | —       | —       | —       | 0.05 | 0.15 | 0.002 | 0.08 | 0.12 | 0.03 | 0.1 |

由于脉冲激光具有峰值功率高、热输入低等优点,本试验中采用旁轴式低功率脉冲激光与非熔化极气体保护焊(TIG)搭建了复合热源焊接系统,焊接装置示意图如图 2 所示。

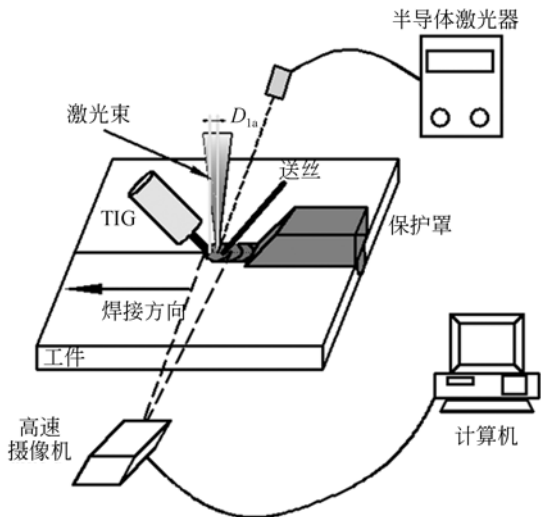


图 2 复合热源焊接装置示意图

Fig. 2 Schematic of laser-TIG hybrid welding system

由于钛合金在高温的化学性能极为活泼,吸附的气体原子固溶到晶格中会使焊接接头的塑性和韧性急剧下降,所以需要采用自制的气体保护装置对焊缝及附近高温区域进行氩气保护。为了减小焊接时熔池上方保护气紊流作用导致的熔池氧化,试验采用电弧在前的复合模式,TIG 焊枪保护气流量为 12 L/min,焊接正面保护气流量为 30 L/min,背面流量为 5 L/min。同时焊接时采用冷填丝的方式,送丝速度固定为 1 500 mm/min。其余焊接参数如表 2 所示。

表 2 复合热源焊接的试验参数

Tab. 2 Test parameters of Laser-TIG hybrid welding

| 激光功率<br>/W | 离焦量<br>/mm | TIG 电流<br>/A | $D_{la}$<br>/mm | 焊接速度<br>/(mm · min <sup>-1</sup> ) |
|------------|------------|--------------|-----------------|------------------------------------|
| 700        | 1          | 250          | 1,2,3,4         | 400                                |

为了研究复合热源焊接过程中电弧等离子体行为和熔池状态,试验中采用采用高速摄像机(2 000 frame/s)对其进行实时监测。基于焊接试板为钛合金,在对钛等离子体状态进行采集前预先分别把中心波长为 514.9 nm、半波宽度为

8.7 nm 的窄带滤光片置于高速摄像机的镜头前部,以便钛谱线穿过。为了便于直观地观测熔池状态,采用光强可调的波长为 808 nm 的半导体激光进行辅助照明,同时把中心波长为 809.5 nm、半波长为 9.2 nm 的窄带滤光片置于高速摄像机镜头前。

焊后观察焊缝背面,并对成形良好的试板参照室温试验方法(ISO6892-1:2009,MOD)标准加工试样(如图 3 所示),然后在电子万能试验机上进行拉伸测试,拉伸速度为 0.5 mm/min。

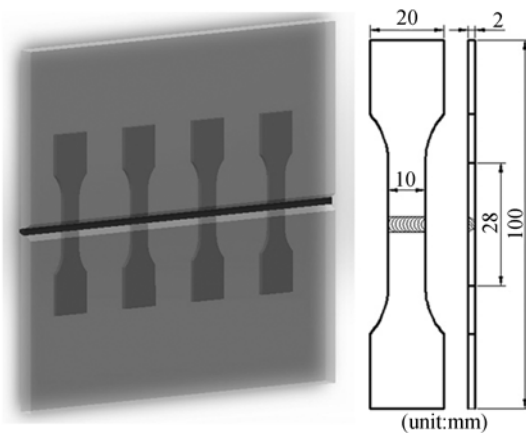


图 3 拉伸试件尺寸

Fig. 3 Schematic of specimens in tensile test

### 3 试验结果

#### 3.1 背面焊缝成形与机械性能

前期研究表明,在复合热源焊接过程中激光与 TIG 电弧之间存在强烈的相互耦合协同作用。热源间距  $D_{la}$  作为复合热源焊接中一个重要参数,决定着激光在电弧形成的熔池表面上的作用位置,从而影响到激光与电弧等离子体之间的耦合效果。已有研究显示在其他焊接参数相同的情况下,调节不同的  $D_{la}$  就可达到不同的相互增强的效果,并得到不同的熔深。而在实际生产应用中,为了控制成形、保证焊缝质量,焊接熔深并不是越大越好。在表 2 拟定的试验参数下进行焊接试验,试验结束后首先对焊缝的背面形貌进行观察,结果如图 4 所示。通过图 4 发现,试验在激光参数与电弧参数以及焊接速度均一致的情况下,仅通过调整  $D_{la}$  就形成了不同的打底焊焊缝形貌。

当  $D_{la}=1\text{ mm}$  时,焊接过程虽然可以实现穿透焊但成形并不均匀;当  $D_{la}=2\text{ mm}$  时,焊缝形貌表现出全熔透不均匀“锋刃”状;当  $D_{la}=3\text{ mm}$  时,焊缝在均匀全熔透的同时成形连续圆滑。而当  $D_{la}$  增加到  $4\text{ mm}$  时,焊缝出现未焊透情况。

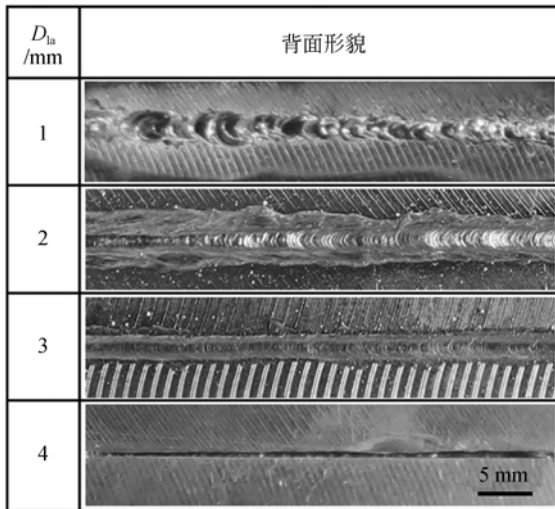


图 4 背面焊缝形貌

Fig. 4 Back morphology of weld seam

这是由于本试验采用旁轴式激光电弧复合模式,TIG 电弧沿钨极有一定的电弧挺度,熔融的液态金属才会大幅提高激光的吸收率,增强耦合放电作用。 $D_{la}$  为  $1\text{ mm}$  或  $4\text{ mm}$  时,电弧分别作用到了焊后凝固或焊接熔池还尚未到达的固态金属,减弱了激光与电弧的耦合效果,降低了耦合电弧的穿透力。 $D_{la}$  为  $2\text{ mm}$  或  $3\text{ mm}$  时,激光均可以作用到焊接熔池中,耦合效果较好,均能获得全熔透焊缝。从试验结果可以得出,2 mm 时的耦合效果最好,耦合电弧穿透力最强,背面焊缝体积也最大。不过与 2 mm 时的背面成形比较,3 mm 时的背面成形更加均匀。

为了验证焊缝的机械性能可靠性,本试验选取成形良好的第 3 组进行静拉伸试验,结果如图 5 所示。从图中可以看出,在第 2 节拟定的拉伸试验规范下拉伸断口位于焊缝处,屈服强度为母材的 96.3%,抗拉强度均达到母材的 95.8%,说明第三组参数下的焊缝在保证成形良好的同时,还能确保良好的机械性能。

### 3.2 电弧等离子体形为与熔池形貌

鉴于脉冲激光的特殊性,本文需要特殊关注

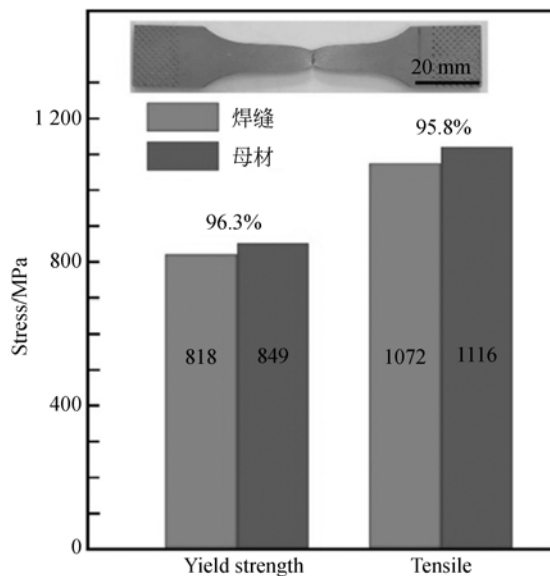


图 5 静拉伸试验结果

Fig. 5 Results of static tensile test

稳定焊接过程中脉冲激光作用前后电弧中起主要作用的钛等离子体行为以及熔池状态的变化现象。采用窄带滤光片对焊缝成形良好参数(第 3 组)下 TA15 钛合金平板堆焊中的钛原子分布和熔池变化进行同步观察,结果分别如图 6 与图 7 所示。图 6 表明,复合热源焊接过程中脉冲激光作用时,钛原子分布空间膨胀,电弧体积增大,表明大量钛原子存在于电弧空间,电弧力也随之增大;在脉冲激光作用之后,随着电弧放电空间过量,钛原子迁出,电弧逐渐恢复至原始状态。

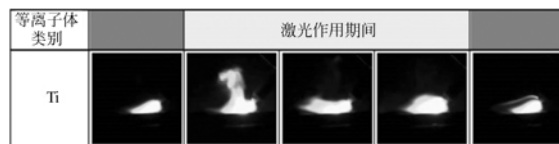


图 6 电弧等离子体行为

Fig. 6 Behaviors of plasma in hybrid welding

结合图 7 的熔池状态可知,脉冲激光作用时,电弧等离子体急剧收缩到激光作用点处,此时熔池波动剧烈,这主要是由于脉冲激光对 TIG 电弧有吸引、压缩和增强的作用,导致熔池有更高的温度梯度,故激光作用点处的温度远高于熔池周围。本试验中 TA15 钛合金复合热源焊接时熔池具有负的表面张力梯度,中心处熔池表面张力最小。由于 Marangoni 效应,熔池前方的液态金属在耦

合电弧力与表面张力的双重驱动下向后流动,熔池前方过热的液体减少。在脉冲激光作用消失后,电弧等离子体布满整个熔池上方,熔池也恢复平稳。

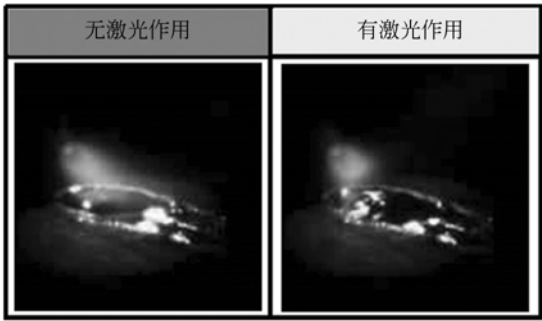


图 7 熔池状态

Fig. 7 States of molten pool

#### 4 讨论分析

熔池的稳定成形必须满足熔池在力学上的平衡。当焊缝背面处于自由状态而又需要全部焊透时,熔池壁对液态金属的吸附力和表面张力的合力共同作用承托起背面熔池,如图 8 所示<sup>[16]</sup>。

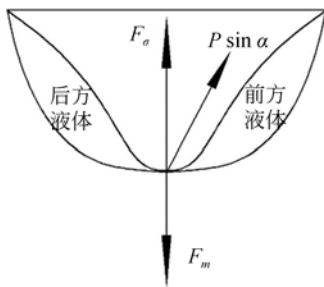


图 8 背面熔池受力示意图

Fig. 8 Sketch of forces on back of molten pool

在理想熔池形状下,熔池保持稳定平衡的条件为:

$$F_{\sigma} = F_m + P, \quad (1)$$

而:

$$F_m = \gamma, \quad (2)$$

因此:

$$F_{\sigma} = \gamma HBL + P, \quad (3)$$

式中: $P$ 为吸附力与表面张力的合力,与液态金属和熔池壁间的作用面积有关; $\gamma$ 为液态金属比重;

$H$ 为背面熔池高度; $B$ 为背面熔池宽度; $L$ 为背面熔池厚度; $P$ 为电弧总压力; $\alpha$ 为电极角度。

由此可见,打底焊接背面成形控制的实质是控制熔池壁的状态达到背面成形可控<sup>[14]</sup>。在本试验中,金属为 TA15 钛合金, $\gamma$ 为定值。由于焊枪角度不变所以  $\alpha$  也不变,同时激光参数与电弧参数均未变化,所以可以将激光作用到熔池时的电弧力  $F_m$  视为定值。故背面焊缝形状只与  $F_{\sigma}$  相关。当背面熔池周围为固态金属时,熔池受到的吸附力与表面张力过大,不利于液态金属向底部流动,导致未焊透现象的出现。当背面熔池周围的金属为液态或流塑态且较多时,熔池受到的吸附力与表面张力较小,向底部流动的液态金属增多导致背面焊缝体积增大,严重的会出现焊瘤或烧穿。

结合 3.2 节中优化参数下的钛等离子体行为与熔池状态,无激光脉冲作用时,电弧熔化母材与钝底形成熔池;当激光脉冲作用熔池且  $D_{la}$  为 3 mm 时,电弧急剧压缩到激光作用点处,熔池前方的熔融液体在耦合电弧力作用下带着热量向后流动到已凝固金属的上方,导致熔池前方液体减少、热量减小,熔池在力的共同作用下达到力学平衡形成稳定的单面焊双面成形工艺。而当  $D_{la}$  为 1 mm 或 4 mm 时,激光作用到固体金属上,导致耦合作用减弱,不足以达到穿透焊。当  $D_{la}$  为 2 mm 时,与  $D_{la}$  为 3 mm 相比更接近熔池前沿,在耦合电弧的挖掘作用下,更多的液体向后方移动,使得熔池后方液态金属增多,对熔池的吸附力下降,更多的液体向熔池底部流动。

综上所述,作为一种先进的焊接工艺,复合热源打底的目的是使熔敷金属与母材充分熔合的同时熔池中各种力的分布更加均匀合理,因此可以通过调节脉冲激光的作用在熔池中的相对位置,利用激光对电弧的诱导调控作用控制焊接时正、背面熔池的热量分配及熔池流动状态,也就是对正背面熔池体积的分配来控制焊缝成形。

#### 5 结 论

本文根据工业生产中钛合金厚板焊接中存在的问题并结合前期工作,对 10 mm 厚钛合金打底单面焊双面成形进行了工艺优化。对脉冲激光作

用前后电弧等离子体和熔池的行为进行观测,从理论上分析了复合热源控制焊缝背面成形的机理。试验结果表明:在最佳工艺参数  $D_{ia}=3\text{ mm}$  时,由于脉冲激光的加入,钛等离子体发生急剧膨胀,在耦合电弧力的挖掘作用下,熔池波动剧烈且向后流动。向后流动的液体将熔池热量向后方转移,使得熔池热量重新分配。脉冲激光作用后钛

等离子体恢复到原长并对钝边进行预热。在这种交替复合热源的耦合作用下,焊缝背面熔池的受力达到平衡同时实现了稳定的钛合金厚板单面焊双面成形工艺。对良好成形的焊缝进行了机械性能测试,结果表明,焊缝的屈服强度与抗拉强度分别为 818 MPa 和 1 072 MPa,分别为母材的 96.3% 与 95.8%,能够满足使用要求。

### 参考文献:

- [1] 乔红超,赵亦翔,赵吉宾,等. 激光冲击强化对 TiAl 合金组织和性能的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7):1766-1773.  
QIAO H C, ZHAO Y X, ZHAO J B, *et al.*. Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAl alloy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7):1766-1773.
- [2] LIU L M, HAO X F, Du X. Microstructure characteristics and mechanical properties of laser - TIG hybrid welding joint of TA15 titanium alloy [J]. *Materials Research Innovations*, 2008, 12 (3): 114-118.
- [3] WAN L, HUANG Y, LV S, *et al.* Narrow-gap tungsten inert gas welding of 78-mm-thick Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials Science and Technology*, 2016: 1-8.
- [4] HOFFMAN D J, DAHLE K R, FISHER D J. *Welding (2 downloads)*[M]. Prentice Hall, 2016.
- [5] 刘殿宝,张广军,吴林. 大厚板双面双 TIG 电弧打底焊熔池成形特性[J]. 焊接学报, 2012, 33(3): 37-40.  
LIU D B, ZHANG G J, WU L. Characteristics of pool formation in backing weld for large and thick plates using double-sided double TIG arc welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(3): 37-40. (in Chinese)
- [6] LIU L, LI C, SHI J. Analysis of energy utilisation efficiency in laser-GTA hybrid welding process[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, 19(7): 541-546.
- [7] 曲兴华,职广涛,张福民,等. 利用信号拼接提高调频连续波激光测距系统的分辨力[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1):41-47.  
QU X H, ZHI G T, ZHANG F M, *et al.*. Improvement of resolution of frequency modulated continuous wave laser ranging system by signal splicing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1):41-47. (in Chinese)
- [8] 王霄,邱唐标,顾宇轩,等. 激光间接冲击下钛箔的微成形特性[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3):633-638.  
WANG X, QIU T B, GU Y X, *et al.*. Microforming properties of Ti foil under laser indirect shock[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):633-638. (in Chinese)
- [9] BUNAZIV I, AKSELSEN O M, SALMINEN A, *et al.* Fiber laser-MIG hybrid welding of 5 mm 5083 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 233: 107-114.
- [10] 樊丁,董丽喆,余淑荣,等. 激光-电弧复合焊接的技术特点与研究进展[J]. 热加工工艺, 2011, 40(11):164-166.  
FAN D, DONG B, YU SH R, *et al.* Technology features and progress of laser-arc hybrid welding [J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(11): 164-166. (in Chinese)
- [11] 熊俊,付忠奎,鄢江武,等. 中厚度 TC4 激光-TIG 复合焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(15): 226-229.  
XIONG J, FU ZH K, YAN J W, *et al.* Research on laser-TIG hybrid welding process for medium thickness TC4 plate[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(15): 226-229. (in Chinese)
- [12] 曹运明. 中厚板钛合金激光-TIG 电弧复合热源焊接研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.  
CAO Y M. *Study on Laser-TIG Arc Hybrid Welding Process of Medium Titanium Alloy Plate*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [13] WAHBA M, MIZUTANI M, KATAYAMA S. Single pass hybrid laser-arc welding of 25 mm thick square groove butt joints[J]. *Materials &*

- Design*, 2016, 97: 1-6.
- [15] TING L, FEI Y, SANG L, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser-arc hybrid welding joint of GH909 alloy[J]. *Optics and Laser Technology*, 2016, 80: 56-66.
- [16] LIU L, YUAN S, LI C. Effect of relative location of laser beam and TIG arc in different hybrid welding modes[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(6): 441-446.
- [17] 彭远江, 马崇山. 手工电弧焊单面焊双面成形的机理及成形控制的探讨(上)[J]. *焊接技术*, 1989, 5: 37-41.
- PENG Y J, MA CH SH. Discussion on the mechanism and forming control of single side welding of manual arc welding[J]. *Weld Technology*, 1989, 5: 37-41. (in Chinese)

#### 作者简介:



史吉鹏(1984-),男,山西阳泉人,博士研究生,2009年、2013年于兰州理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事钛合金复合热源焊接的研究。E-mail: shijp@mail.dlut.edu.cn

#### 导师简介:



刘黎明(1967-),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士生导师,1987年、1992年、2000年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为辽宁省先进连接技术重点实验室主任,主要从事新材料先进方法和技术、焊接过程计算机仿真与控制、焊接装备智能化和数字化的研究。E-mail:liulm@dlut.edu.cn