

文章编号: 1001-3806(2011)01-0065-05

激光-电弧复合焊接工艺参数的研究进展

崔丽, 贺定勇, 李晓延, 蒋建敏, 王智慧

(北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124)

摘要: 激光-电弧复合焊接是近几年在国际上得到迅速发展和应用的焊接前沿新技术, 是材料优质高效连接的最佳熔焊工艺。激光-电弧复合焊接结合了激光焊和电弧焊两种工艺, 影响焊接过程的参量较多, 而这些因素的设置对焊接过程的稳定性、焊接接头的质量都有重要影响。从激光器类型的选择、辅助电源类型的选择、焊接方向、激光离焦量、激光-电弧之间距离、激光与电弧能量的匹配以及保护气体等方面讨论了激光-电弧复合焊接过程中的工艺参数的优化设置问题, 并对这些因素对焊缝成形的影响进行了分析, 最后提出了激光-电弧复合焊接工艺的研究方向。

关键词: 激光技术; 激光-电弧复合焊接; 焊接工艺; 焊缝成形

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.01.019

Research progress of laser-arc hybrid welding processing parameters

CUI Li, HE Ding-yong, LI Xiao-yan, JIANG Jian-min, WANG Zhi-hui

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Laser-arc hybrid welding, as an innovative fusion welding technology, has attracted tremendous attention recently and has already been investigated for applications in many fields. However, laser-arc hybrid welding, as the combination of laser welding and arc welding process, involves a large number of parameters. These parameters and identified settings have important influence on the welding stability and weld quality. The effects of process parameters such as laser types assistant power supply, welding direction, focal point position, laser-arc distance, ratio of laser to arc power, shielding gas on the weld shape were reviewed. The future work should be made in this area was presented at last.

Key words: laser technique; laser-arc hybrid welding; welding process; weld shape

引言

随着激光焊接在工业生产中的应用日益广泛, 激光焊接工艺的局限性日益突出, 主要表现为: 激光焊接能量利用率低、焊接厚度增加导致生产成本急剧增加; 激光焊接对工件的焊接装配精度要求高、坡口搭桥能力弱, 这给实际应用带来很大的困难; 由于强烈金属汽化, 激光焊缝易产生咬边、凹陷和气孔缺陷, 而且很难通过工艺参量调节来消除; 激光焊的冷却速度过大, 焊缝易形成脆性相, 接头的塑性和韧性较低。为解决上述激光焊接的问题, 国内外研究者进行了不断的探索。激光-电弧复合热源的研究现已逐步成为国际焊接界的关注焦点, 并得到了广泛重视。

激光-电弧复合热源焊接是将激光焊接和电弧焊

接结合起来实现优质高效焊接生产的一种新的焊接工艺。与传统电弧焊接和激光焊接相比, 激光-电弧复合焊接具有大焊接熔深、高工艺稳定性、高焊接效率、较强的焊接间隙桥接能力和小焊接变形等优点, 能够大幅度提高焊接效率和焊接质量^[1-3]。近年来, 激光-电弧复合热源焊接作为一种优质高效的焊接方法, 具有广阔的市场应用前景和很强的竞争力, 是当前国际上的一项热门技术和研究热点。但是由于该焊接方法结合了激光焊接和常规电弧焊接两种焊接方法, 因此, 影响焊接过程的因素较多, 焊接工艺相对比较复杂^[1]。众所周知, 不合理的工艺参量将导致其焊缝成形不规则、凹陷、烧穿等不良焊缝成形。焊接接头的焊缝成形和焊缝质量密切相关, 只有好的焊缝成形才具有优良的接头力学性能^[4]。因此, 在激光-电弧复合焊接应用中, 如何根据焊接要求来制定工艺参量以有效地控制焊缝成形就显得至关重要。

近年来, 国内外学者对激光-电弧复合焊接工艺的研究和开发较多, 但是对复合焊接工艺问题的研究仍不系统, 有些研究成果的报道还相互矛盾。针对这些问题, 作者在激光与电弧复合热源的相互作用分析的

基金项目: 航空科学基金资助项目(20085475003); 国防科技重点实验室基金资助项目(9140C4051030802)

作者简介: 崔丽(1972-), 女, 博士, 副研究员, 现主要从事轻金属材料激光焊接的研究。

E-mail: cuili@bjut.edu.cn

收稿日期: 2010-03-23; 收到修改稿日期: 2010-04-21

基础上,详细探讨了激光-电弧复合热源的设置、辅助电源类型的选择、焊接方向、激光离焦量、激光-电弧之间距离、激光与电弧能量的匹配、焊接电源的极性以及保护气体因素对焊缝成形的影响,力图澄清激光-电弧复合焊接工艺研究中存在的一些问题,为这种新型焊接技术在工业的成功应用提供参考。

1 激光-电弧复合焊热源的设置

1.1 选择激光器的类型

在激光-电弧复合焊接研究中,由于激光热源所具有的优良特性,常常将激光作为主热源,电弧为辅助热源,通过热源匹配,获得良好的焊接效果。可用于激光-电弧复合焊接的激光主要有 CO₂ 激光、Nd:YAG 激光和近年来发展起来的光纤激光。20 世纪 90 年代以前,CO₂ 激光器和 YAG 激光器占工业激光器的 96% 以上^[1],20 世纪 90 年代以来,光纤激光器在输出功率和工作稳定性方面有突破性进展。

1.1.1 CO₂ 激光与电弧的复合 CO₂ 激光器是最早用在复合焊中的激光器^[5-6]。功率大(目前可达 50kW)是 CO₂ 激光器的主要特点。但 CO₂ 激光器必须用光学系统传输,自动化程度较低,传输的安全性也较差。由于高功率 CO₂ 激光的光致等离子体对激光能量屏蔽大,需要特殊的气体保护^[6]。

1.1.2 Nd:YAG 激光与电弧的复合 Nd:YAG 是利用了其 1060nm 短波的优势,为了焊接铝合金和某些钢的过程中而使用的^[7-8]。Nd:YAG 激光波长短,可以实现光纤传输(且距离长达 70m),容易实现机器人焊接,焊接中等离子体屏蔽效应较弱,还可以实现几个工作站同时共享一个激光源,从而节省开机时间和成本。但是,Nd:YAG 激光相对价格高、功率低,最大功率为 6kW(在日本,已有 10kW 的用于实验)。由于 YAG 激光器能够进行光纤传输、光致等离子体屏蔽作用小等特点,使得研究人员更加倾向于选用 YAG 激光器与电弧复合焊接^[9]。

1.1.3 光纤激光与电弧的复合 近年来,光纤激光器以其光束质量好、电光转换效率高、维护费用低、抽运寿命高及可光纤传输等显著优势,受到广泛的关注,得到了飞速的发展^[10-11]。单模光纤激光器在波长 1070nm 输出的激光功率可从几瓦到 1000W,但通过光纤激光集聚,可以输出满足工业加工的大功率激光,目前实用的最大功率可达 30kW。国外许多知名的研究机构对光纤激光-电弧复合焊接展开积极的研究。2006 年英国焊接研究所采用 7kW 的光纤激光与电弧复合,进行工业纯钛和 TC4 钛合金不同厚度板、管的不同接头的系列工艺试验^[12]。试验结果表明,光纤激

光可以以相当高的焊接速率焊透板厚 10mm 的钛合金,同时获得高质量的焊接接头,坡口间隙的提高和高效率也可通过光纤激光-电弧复合焊接来实现。

1.2 选择辅助电源类型

目前,通常选用的辅助热源有钨极惰性气体焊(tungsten inert gas, TIG)、等离子弧焊(plasma arc welding, PAW)及惰性气体保护金属极电弧焊/熔化极活性气体保护焊(metal inert gas/metal active gas, MIG/MAG)。常用的激光-电弧复合形式有激光-TIG 焊、激光-PAW 焊和激光-MIG/MAG 焊 3 种。最早的复合热源研究是从 CO₂ 激光-TIG 焊复合开始的,主要用于薄板金属的焊接。激光-PAW 焊在薄板对接、镀锌板搭接、铝合金焊接及切割、表面合金化等都有研究。激光-MIG/MAG 复合焊灵活性较强,是近年来最受业界瞩目的复合焊接技术之一。目前,各国焊接工作者在激光-MIG/MAG 轴复合焊研究中已经取得了一定的进展,HighYAG, Fronius 等一些大厂家已能够生产复合焊炬专用设备,这些复合焊炬专用设备已出现在工业生产应用中^[13]。

除了上述 3 种常用的激光-电弧复合方式外,还有如激光-多弧复合焊、激光-埋弧复合焊等其它组合方式。

2 激光-电弧复合焊接工艺参量的选择

影响激光-电弧复合焊接过程的工艺参量较多,对于焊接工艺的规范参量,如激光功率、焊接速率、焊接电流、电弧电压,这些因素对焊缝成形影响的研究报道较多,本文中不再赘述。下面主要讨论焊接方向、激光与电弧间距、离焦量、两种焊接热源的匹配、保护气体及激光与焊枪的夹角工艺因素对复合焊焊缝成形的影响及研究现状。

2.1 焊接方向

根据激光与电弧的相对位置,焊接方向有两种:一是激光在电弧前面,称为激光引导电弧焊;另一种是电弧在激光前面,称为电弧引导激光焊。

近年来,虽然对焊接方向的研究很较多,但是得出的结论却有些不同。有些学者认为,同等焊接工艺参量下,仅改变焊接方向,激光引导电弧焊的熔深、熔宽比电弧引导激光焊的大^[14-16]。NIELSEN^[14]等人的研究表明,如果 MAG 电弧放在激光的后面可以增加 10% 的焊缝熔深。CHEN 等人^[15]认为,其它焊接工艺参量相同时,激光前置比激光后置形成的焊缝熔深和熔宽大,余高小。LEI 等人^[16]在激光-MAG 复合焊的研究中发现,在相同的焊接参量下,激光引导电弧焊要比电弧引导激光焊焊缝熔深大,并且焊缝成形比较美

观。这是因为激光引导电弧焊时,激光作用在熔池前沿,有利于形成较大的熔深;电弧引导激光焊时,激光作用在熔池后部,激光能量的传输容易受到熔滴过渡和熔池液态金属向后流动的影响,因此激光能量对熔深的贡献就小。

但是,在 CO_2 激光-MIG复合焊接时,电弧引导激光焊与激光引导电弧焊焊接时,焊缝熔深几乎没有变化。此外,WANG等人认为^[17],激光-短路过渡电弧MAG复合焊接时,电弧引导激光焊时焊缝熔深较深,而焊缝熔宽较窄,如图1所示。激光在前进行焊接时,

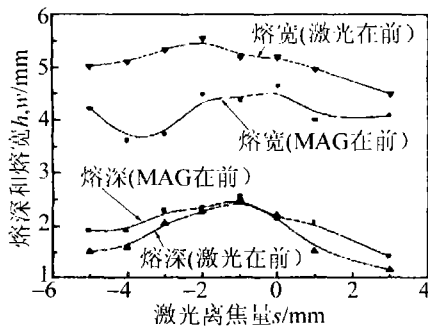


图1 焊接方向对焊缝熔深和熔宽的影响

激光能量对工件起到预热作用,提高了MAG焊接熔池的流动性,使得液态熔池更容易向四周铺展,因此获得的熔宽比较宽。当激光在后进行焊接时,激光始终照射在液态金属熔池里,液态金属对激光的吸收率远远大于固态金属,即用于焊接的有效激光能量增加了,焊接熔深自然增加了。GAO等人^[18]研究了激光-MIG复合焊接高反射率的铝合金中激光与电弧前后位置对焊缝成形的影响。他们的结果表明,电弧引导激光焊与激光引导电弧焊相比,熔宽和熔深都有所增加,而前者更容易形成深熔小孔焊。

2.2 激光与电弧间距 $D_{l,a}$

激光与电弧间距 $D_{l,a}$ 一般以激光光斑中心到未起弧时焊丝延长线与工件交点的距离表示。 $D_{l,a}$ 的大小决定了激光与电弧是否共同形成熔池,因此,是复合焊中一个重要的工艺因素。

ISHIDE等人对脉冲MIG焊与YAG激光复合焊接的研究发现,激光在前, $D_{l,a} = 2\text{mm}$ 时能得到最大熔深,而在 $D_{l,a} = 0\text{mm}$ 时,焊缝熔深最小^[19]。WANG等人^[17]在对短路过渡的MAG与YAG激光复合焊接研究时发现,无论是激光在前还是激光在后, $D_{l,a} = 1\text{mm}$ 时能形成最大熔深,并且焊接过程最稳定。但是,LIU^[20]等人认为,焊缝最大熔深可以在 $D_{l,a} = 0\text{mm}$ 时获得。这是因为随着 $D_{l,a}$ 增大,激光与电弧的相互作用减弱,热源能量分布到不同的部位,因而减小了焊缝熔深。

在激光-电弧复合焊接中, $D_{l,a}$ 的选择应当使得激

光与电弧之间能产生有效的相互作用,使得激光作用于电弧熔池的最低点^[21]。这意味着 $D_{l,a}$ 应该在一定的范围内。如果间距太大,两种焊接热源相互独立,不能相互作用。当 $D_{l,a} = 0\text{mm}$ 时,更多的激光能量用于焊丝金属的熔化,而用于穿孔的能量相对减少,所以在 $D_{l,a} = 0\text{mm}$ 时并不能得到最大熔深。一般认为,获得最大焊缝熔深的 $D_{l,a}$ 为 $1\text{mm} \sim 3\text{mm}$ 。

2.3 激光离焦量的影响

离焦量是激光焊接过程中的一个重要规范参量,对于焊缝成形影响较大。激光束焦点距材料表面的距离通常被定义为离焦量,影响作用于材料表面的激光功率密度。通常定义焦点位于材料表面时的离焦量为0,焦点位于材料表面之上为正离焦量,焦点位于材料表面之下为负离焦量。

在复合焊中,由于电弧熔池对激光的影响,激光焦点位置与单一激光焊的焦点位置可能不同:当Nd:YAG激光-TIG复合焊与单一激光焊比较时,发现焦点位置没有发生变化;当使用5kW的 CO_2 激光器与17kW的金属极气体电弧焊(gas metal arc welding, GMAW)复合焊接时,测得的焦点位置比单独激光焊的焦点位置低 0.7mm ^[22]。

在复合焊中,激光焦点位置的变化对电弧的稳定性、焊缝的熔宽影响不大,但对熔深有较大的影响,存在一个获得最大熔深的最佳位置^[19]。WANG在研究电弧焊接短路过渡与YAG复合时,最佳离焦量为 -1mm ^[17]。ISHIDE对射流过渡的情况作了研究,发现最佳离焦量为负值,约为 -1mm ^[19]。因此,最佳离焦量的选取要视具体的工艺过程来定,与电弧焊的熔滴过渡形式有很大的关系。电弧焊短路过渡时熔池液面高于工件表面,射滴过渡和射流过渡时熔池液面下凹,低于工件表面,所以,对于不同的熔滴过渡形式,复合时所选取的最佳离焦量是不同的。

2.4 激光与电弧能量的匹配

由于已有的复合焊接工艺参量对焊缝形貌影响的研究大都是以单工艺参量来进行的,缺乏参量之间的相互联系,而RAYES等人^[5]发现激光与电弧能量的匹配对复合焊缝形貌的影响也很重要,它们之间存在着奇妙的关系。根据两个热源的能量之比,激光-电弧复合焊接可以近似为电弧焊接或激光焊接。对于一定厚度的材料,复合焊的焊接熔池可以分为“激光部分”和“电弧部分”。RAYES和WALZ探讨了激光、电弧功率与焊缝熔深熔宽的关系,表明激光功率及MAG电弧电流不同匹配对熔深、熔宽有着较大的影响。CHEN^[15]等人也对激光与电弧能量的匹配参量与焊缝形貌关系作了初步研究,并认为在一定的焊接工艺条

件下, YAG/MAG 复合焊才具有协同效应。

图2为MAG电弧功率与激光功率的比值与焊缝熔深的关系^[23]。当激光功率不变, 将MAG电弧功率从1.45kW增加到4.6kW时, 焊缝熔深从3.2mm增加到3.8mm; 当电弧功率不变, 激光功率从2kW减小到0.9kW时, 焊缝熔深从3.2mm减小为2mm。可见, 激光功率的变化对焊缝熔深较大。

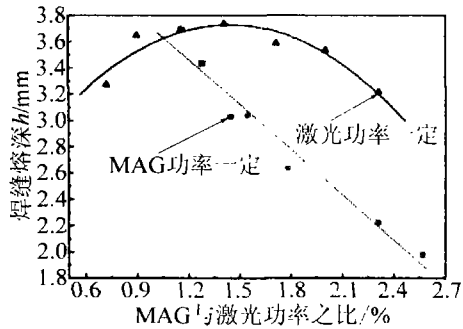


图2 MAG/激光能量配比与焊缝熔深的关系

WANG认为, 在激光-MIG电弧复合焊的研究中, 激光功率主要影响焊缝熔深, 电弧功率主要影响熔宽, 激光-电弧的交互作用有利于增加熔深, 却负作用于熔宽的增加^[24]。当激光功率不变, 增大电弧功率, 熔深先增大后减小, 激光电弧复合强化作用先增强后减弱, 说明激光电弧相互作用于焊缝有更深一层的联系。

2.5 保护气体

到目前为止, CO₂激光和Nd:YAG激光是在激光-电弧复合焊中研究得最多的激光, 而使用的保护气体不同是CO₂激光和Nd:YAG激光复合焊接的主要差别之一。

CO₂激光在焊接区会产生高温高密度激光等离子体, 吸收、反射和散射激光的能量, 因此, 必须减少这种等离子体。焊接时的保护气体对于等离子体的减少是很重要的。复合焊中, 混合保护气的各气体成分产生的作用是不同的, 选择合适的保护气体既能减少等离子体, 又能增强电弧稳定性。采用5kW CO₂激光和17kW GMAW复合焊中, 如果在氦气中添加不超过50%的氩气, 则对焊缝熔深没有影响。在采用6kW CO₂激光与GMAW复合焊接6mm板厚RAEX275MC试验中, 50%~80%的He与Ar, CO₂和O₂气混合为理想的保护气体。焊缝质量的提高可以通过直接或间接添加少量的O₂来实现。因为保护气体He容易在焊缝形成咬边缺陷, 而添加CO₂, O₂可以美化焊缝成形, 但却不利于增大焊缝的熔深。

在Nd:YAG激光-电弧复合焊中等离子体吸收激光能量不是一个主要的问题^[1,25], 因此, 保护气体的选择由保护程度和电弧稳定性的需要来决定。在MIG/MAG焊接中, 无飞溅、最好的熔滴过渡可以用Ar气保

护获得。添加1%~5% O₂或20% CO₂也有利于熔滴过渡及减小飞溅。

2.6 激光与焊枪的夹角

在激光与电弧的组合中, 激光束的入射方向大都选择为垂直工件, 因为这种方式能获得最佳熔深。也有采用激光束非垂直入射的, 如利物浦大学的TRAVIS^[26]。旁轴复合形式中为确保激光束能与电弧同时较好作用于同一熔池, 焊枪与光束夹角通常选择在15°~50°之间。

2.7 AC/DC焊接电源

在复合焊接中, 选择直流焊机和交流焊机所得到的焊缝熔深有较大的差别。在其它焊接参量相同的情况下, 直流脉冲电弧焊的熔深大于交流脉冲电弧焊的熔深。

3 结束语与展望

激光-电弧复合焊接是近几年在国际上迅速发展的焊接前沿新技术, 其焊接过程的影响因素较多, 焊接工艺相对比较复杂, 而这些因素对于复合焊接过程的稳定性、焊接接头的质量都有重要影响, 激光-电弧复合焊接工艺的研究尚不完善, 还需要解决以下的问题: (1)对于激光与电弧设置方面的因素, 如焊接方向、激光与电弧能量的匹配、焊接电源的极性以及保护气体等; (2)数值模拟对于激光-电弧复合焊接工艺参量的优化发挥着重要作用, 但目前对于复合焊接温度场、焊缝成形等问题的数值模拟却非常有限, 特别需要系统深入的研究。

参考文献

- [1] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laser hybrid welding [J]. Journal of Laser Applications, 2005, 17(1): 2-14.
- [2] CHO M H, FARSON D, LIM Y C, et al. Hybrid laser/arc welding process for controlling bead profile [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(8): 677-687.
- [3] QING L, LEI Z, LINS Y. Effects of Nd: YAG laser + pulsed MAG arc hybrid welding parameters on its weld shape [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(1): 79-86.
- [4] JIANG H Zh. Arc welding and electron slag welding [M]. Beijing: China Machine Press, 1988: 70-86 (in Chinese).
- [5] RAYES M E, WALZ C, SEPOLD G. The influence of various hybrid welding parameters on bead geometry [J]. Welding Journal, 2004, 83(5): 147s-153s.
- [6] NEFEDOV I S, TRETAKOV S A. Photonic band gap structure containing metamaterial with negative permittivity and permeability [J]. Physics Review, 2002, E66(3): 36611/1-36611/4.
- [7] JOKINEN T, KARHU M, KUJANPAA V. Welding of thick austenitic stainless steel using Nd:YAG laser with filler wire and hybrid process [J]. Journal of Laser Applications, 2003, 15(4): 220-224.
- [8] SHIBATA K, SAKAMOTO H, IWASA T. Laser-MIG hybrid welding of aluminium alloys [J]. Welding in the World, 2006, 50(1/2): 28-

- 34.
- [9] GAO M, ZENG X Y, HU Q W. CO₂ laser-pulsed MAG hybrid welding of mild steel[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5):498-500 (in Chinese).
- [10] BRENNER B, GOBEL G, DITTRICH D. Use of fiber lasers with highest beam quality for welding of steel and light weight alloys [C]//The Fourth International Congress on Laser Advantaged Materials Processing. Kyoto, Japan: Japan Laser Processing Society, 2007:247-252.
- [11] VOLLERTSEN F, THOMY C. Welding with fiber laser from 200W to 17000W[C]// Proceedings of ICALEO 2005. Miami: Laser Institute of America, 2005:254-263.
- [12] MELTON G. High productivity arc and laser welding of titanium and titanium alloys [EB/OL]. [2010-03-17]. <http://www4.twi.co.uk/j32k/gsp/PR10569-ProjectOutline.pdf>.
- [13] PETRING D, FUHRMANN C. Recent progress and innovative solutions for laser-arc hybrid welding [C]// Proceedings of PICALO 2004. Melbourne: Laser Institute of America, 2004: 7-10.
- [14] NIELSEN S E, ANDERSEN M M, KRISTENSEN J K. Hybrid welding of thick section C/Mn steel and aluminium [C]//Meetings of IIW Commission XII During International Institute of Welding Annual Assembly. Copenhagen, Denmark: International Institute of Welding, 2002:1-15.
- [15] CHEN L, DONG Ch L, LU G Sh. Research on YAG laser/MAG arc hybrid welding[J]. *Welding Technology*, 2004, 33(4):21-23 (in Chinese).
- [16] LEI Zh, QIN G L, LIN Sh Y. Development of laser-MIG/MAG arc hybrid welding technology[J]. *Welding and Joining*, 2005(9):9-13 (in Chinese).
- [17] WANG W, WANG X Y, ZHAO Z L. Influential factors in laser-MAG hybrid welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(2):6-11 (in Chinese).
- [18] GAO Zh G, HUANG J, LI Y L, *et al.* Effect of relative position of laser beam and arc on formation of weld in laser-MIG hybrid welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(12):70-73 (in Chinese).
- [19] ISHIDE T, TSUBOTA S, WATANABE M. Latest MIG, TIG arc-YAG laser hybrid welding systems for various welding products[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4831:347-352.
- [20] LIU Zh J, XU G J, KUTSUNA M H. Laser and laser-MAG hybrid welding of high strength steel using fiber laser and CO₂ laser[J]. *Welding International*, 2008, 22(1):254-260.
- [21] DONG Ch L, CHEN L, LU G Sh. The hybrid YAG-MAG laser arc welding technology of stainless steel[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2005(3):69-71 (in Chinese).
- [22] HYATT C V, MAGEE K H, PORTER J F, *et al.* Laser-assisted gas metal arc welding of 25mm-thick HY-80 plate[J]. *Welding Journal*, 2001, 80(7):163s-172s.
- [23] LIU Zh J. Study on laser-arc hybrid welding of high strength steel [D]. Nagoya, Japan: Nagoya University, 2007:8-15.
- [24] WANG Zh Y. Fundamental research on laser-MIG arc hybrid welding and its application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006:47-53 (in Chinese).
- [25] JASNAU U F, HOFFMANN J, SEYFFARTH P. Nd:YAG-laser-gas metal arc-hybrid welding: a chance for the use of the advantages of laser technology and flexible automation in shipbuilding and steel construction[C]//2002 International Conference on Robotic Welding, Intelligence and Automation. Shanghai: Robotics & Automation Committee of CWS, 2002:1-13.
- [26] TRAVIS D, DEARDEN G, REUTZEL E W. Sensing for monitoring of the laser-gmaw hybrid welding process [C]// Proceedings of ICALEO 2004. San Francisco, California: Laser Institute of America, 2004: 76-85.

(上接第30页)

出,避免了对原图像细节的破坏。并通过对具体的激光主动成像实验所成图像进行滤波处理,定性定量地比较了传统中值滤波和新方法滤波的结果。从分析数据可以看出,新方法具有更好的滤波效果。

参 考 文 献

- [1] WANG X K, LI F. Improved adaptive median filtering[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(3):175-177 (in Chinese).
- [2] ZHU J H, YANG X, LI J. An improved adaptive security details of the median filter[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2001, 37(3):93-95 (in Chinese).
- [3] BROWNR I D. The weighted median filter[J]. *Communication Association Computer Machine*, 1984, 27(8):807-818.
- [4] ZHANG M Q, LI L. Improved of median filter[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2007, 26(5):77-80 (in Chinese).
- [5] DONG J Y, ZHANG J Y. A simple filtering algorithm of salt and pepper noise [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(20):27-28 (in Chinese).
- [6] LI Z Q, WANG Q, LI Q. Multiplication model of speckle image and speckle suppression in imaging lidar[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2003, 30(8):717-720 (in Chinese).
- [7] XIE F Y, ZHAO D P. Visual C++ digital image processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008:245-247 (in Chinese).
- [8] KWAN P, KAMEYAMA K, TORAICHI K. On a relaxation-labeling algorithm for real-time contour-based image similarity retrieval [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(3):285-294.
- [9] RAMCHANDRAN K, VETTERLI M, HERLEY C. Wavelets, subband coding, and best bases[J]. *IEEE*, 1996, 84(4):541-560.
- [10] ZHANG X M, XU B Sh, DONG Sh Y, *et al.* Adaptive switching median filter for the removal of impulse noise [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(6):79-81 (in Chinese).
- [11] XU X W, GUO J, YU Q Y, *et al.* Laser range-gated imaging technologies[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6):603-605 (in Chinese).