

# 7075-T6 铝合金激光对接焊质量的超声波探伤测试与分析

罗开玉 苏柏 吕刺 林通 刘娟 王庆伟 鲁金忠

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 采用 Nd:YAG 激光对 7075-T6 铝合金进行激光对接焊试验, 利用超声波探伤仪对对接焊试块进行探伤并获得对接焊试块的波形图, 并用经验波形分析方法对波形图进行分析, 得到不同焊接工艺参数下典型的超声波回波特征, 建立了激光对接焊工艺参数与回波特征的对应关系。试验结果表明: 激光器电压、激光离焦量和焊接移动速度对铝合金对接焊缝质量有着重要的影响。分析超声波探伤回波的波形, 获得了 7075-T6 铝合金激光对接焊的最佳工艺参数。该技术为焊缝质量检测提供了一种新方法。

**关键词** 测量; 激光对接焊; 超声波探伤; 超声波回波; 7075-T6 铝合金

**中图分类号** TG456.7; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.061203

## Measurement and Analysis of Laser Butt Welding of 7075-T6 Aluminum Alloy by Ultrasonic Inspection

Luo Kaiyu Su Bai Lü Ci Lin Tong Liu Juan Wang Qingwei Lu Jinzhong

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** Laser butt welding of 7075-T6 aluminum alloy is carried out by Nd:YAG laser, and the welding sample quality is measured by ultrasonic fault detector. The ultrasonic echo data are gathered and analyzed by experiential waveform analysis, and different typical echo data are collected at different processing parameters of laser butt welding. The relation between echo feature and processing parameters of laser butt welding is also obtained. The research results show that processing parameters of laser butt welding including laser voltage, laser defocusing amount and welding speed are very important to the welding quality. The optimum processing parameters can be obtained by analyzing the ultrasonic echo data. The research provides a new method to measure the quality of welding seam.

**Key words** measurement; laser butt welding; ultrasonic inspection; ultrasonic echo; 7075-T6 aluminum alloy

**OCIS codes** 120.1880; 120.6660; 350.3390

## 1 引言

激光焊接是利用高能量密度的激光脉冲对材料进行微小区域内的局部加热, 激光辐射的能量通过热传导向材料的内部扩散, 将材料熔化后形成特定熔池以达到焊接的目的<sup>[1,2]</sup>。由于材料的焊接是一个快速而不均匀的热循环过程, 而且都是在极快的条件下进行的, 如果成形工艺控制不当, 很容易引起焊件变形, 在成形件中形成裂纹, 直接影响焊接结构的质量和使用性能<sup>[3,4]</sup>。

目前焊缝质量的常用无损检测方法主要有磁粉检测法、射线检测法、电磁涡流法、渗透检测法以及超声探伤检测法。磁粉检测法所用设备简单、操作方便、观察缺陷直观快速, 能确定缺陷的位置、大小和形状, 有较高的检测灵敏度, 但是只能检测铁磁材料, 而且探伤步骤比较繁琐<sup>[5]</sup>。射线检测技术几乎适用于所有材料, 能直观地显示缺陷影像, 便于对缺陷进行定性、定量分析。但是它难于发现垂直于射线方向的薄层缺陷, 而且检测费用高, 同时射线对人体有害<sup>[6]</sup>。电磁涡流法检测速度快, 对近表面缺陷有较高的灵敏度, 能在高温状态下进

收稿日期: 2013-03-05; 收到修改稿日期: 2013-03-13; 网络出版日期: 2013-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(51105179)资助课题。

作者简介: 罗开玉(1975—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光加工与检测技术等方面的研究。

E-mail: luoteacher@126.com

行探伤,可用于异形材料和小零件检测,使用范围广,但只能检测导电材料,难以判断缺陷种类,灵敏度也相对较低<sup>[7]</sup>。渗透检测法使用方法简单,成本低廉,缺陷显示直观,检测灵敏度高,可检测的材料与缺陷范围广,一次操作可检测多个零件,但是只能检出零件表面开口缺陷,不适用于多孔性材料的检测,对零件和环境有污染<sup>[8]</sup>。而本文采用超声探伤检测方法,它相比以上几种检测方法而言,具有灵敏度高、指向性好、穿透力强、检测速度快、对人体没有伤害以及对试件和环境没有污染等优势,能对缺陷进行定位和定量检测,适用范围广<sup>[9]</sup>。

超声波探伤是利用超声波能透入金属材料的深处,并由一截面进入另一截面时,在界面边缘发生反射的特点来检查零件缺陷的一种方法。超声波束自零件表面由探头通至金属内部,遇到缺陷与零件底面时就分别发生反射,在荧光屏上形成脉冲波形,根据这些脉冲波形可以判断缺陷位置和大小。目前该探伤方法广泛应用在各种尺寸的锻件、轧制件、焊接焊缝和某些铸件等方面<sup>[10]</sup>。本文以 7075-T6 铝合金为对象,采用超声波探伤检测技术,对其激光对接焊焊缝进行检测,获得不同工艺参数下激光对接焊焊缝的典型回波特征,并用经验波形分析法对波形图进行分析,得到不同对接焊工艺参数下典型的超声波回波特征,建立了激光对接焊工艺参数与回波特征的对应关系,能够获得 7075-T6 铝合金的最佳激光对接焊工艺参数,为焊缝质量检测提供了一种新方法。

## 2 试验方法

### 2.1 试验材料

试验材料采用 7075-T6 铝合金板,其化学成分如表 1 所示,试样的尺寸为 150 mm×70 mm×5 mm。

表 1 7075-T6 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 7075-T6 Al alloy

Composition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Mass fraction /%	0.40	0.50	1.2~2.0	0.30	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	0.20	Balance

### 2.2 试验设计以及工艺参数

激光对接焊接试验采用德国 Rofin 公司 StarWeld250 型 Nd:YAG 固态脉冲激光器,其最大平均功率为 250 W,波长为 1064 nm,模式为多模,焦距为 110 mm。激光器平均功率由电压( $U$ )、脉冲宽度( $T_p$ )、正离焦量( $S$ )和频率( $f$ )共同控制。该系统配备三轴联动工作台,平台行程 300 mm×300 mm×200 mm,速度( $v$ )为 0~3000 mm/min。对接焊前用砂纸将焊件表面打磨平整,并用丙酮清洗打磨表面,以去除氧化膜、污垢和毛刺等杂物。焊接采用专业夹具进行夹持,以便焊接时移动,减少焊接过程中的焊接变形。焊接时不需要填料,单道焊接,用氩气保护,其流量控制在 20 L/min。

试验初期通过对接焊测试,得出 7075-T6 铝合金对接焊参数范围为: $U=450\sim480$  V, $T_p=2$  ms, $V=90\sim120$  mm/min, $S=4\sim7$  mm, $f=30$  Hz。在这个范围内进行 12 组 7075-T6 铝合金激光对接焊试验,具体参数如表 2 所示。

表 2 7075-T6 铝合金激光对接焊试验参数

Table 2 Parameters for 7075-T6 Al alloy laser butt welding

Number	$U$ /V	$S$ /mm	$V$ /(mm/min)	$f$ /Hz	Number	$U$ /V	$S$ /mm	$V$ /(mm/min)	$f$ /Hz
1	460	6	90	30	7	470	6	110	30
2	460	6	100	30	8	480	6	110	30
3	460	6	110	30	9	460	4	110	30
4	460	6	120	30	10	460	5	110	30
5	450	6	110	30	11	460	6	110	30
6	460	6	100	30	12	480	7	110	30

焊接完成以后,用砂纸打磨待测试块表面再进行抛光,以去除试块表面的氧化膜、污垢和毛刺等杂物。使用超声波探伤仪对对接焊试块进行探伤。探伤完成之后,将试块沿着横截面切开,采用标准金相试样制备工序制成试样,采用 Olympus OSL3000 型激光共聚焦显微镜拍摄焊缝截面图。

## 3 试验结果分析

### 3.1 焊接移动速度对对接焊质量的影响

当激光脉宽为 2 ms, 激光正离焦量为 6 mm, 脉冲激光频率为 30 Hz, 激光器的电压为 460 V 保持不变, 焊接移动速度分别为 90、100、110 和 120 mm/min 时, 对试块进行激光对接焊试验, 采用超声波探伤仪对试块分别进行扫描。超声波回波波形图如图 1(a)、(b)、(c)、(d) 所示。图 1(e)、(f)、(g)、(h) 是对应的共聚焦显微镜拍摄的焊缝截面图。

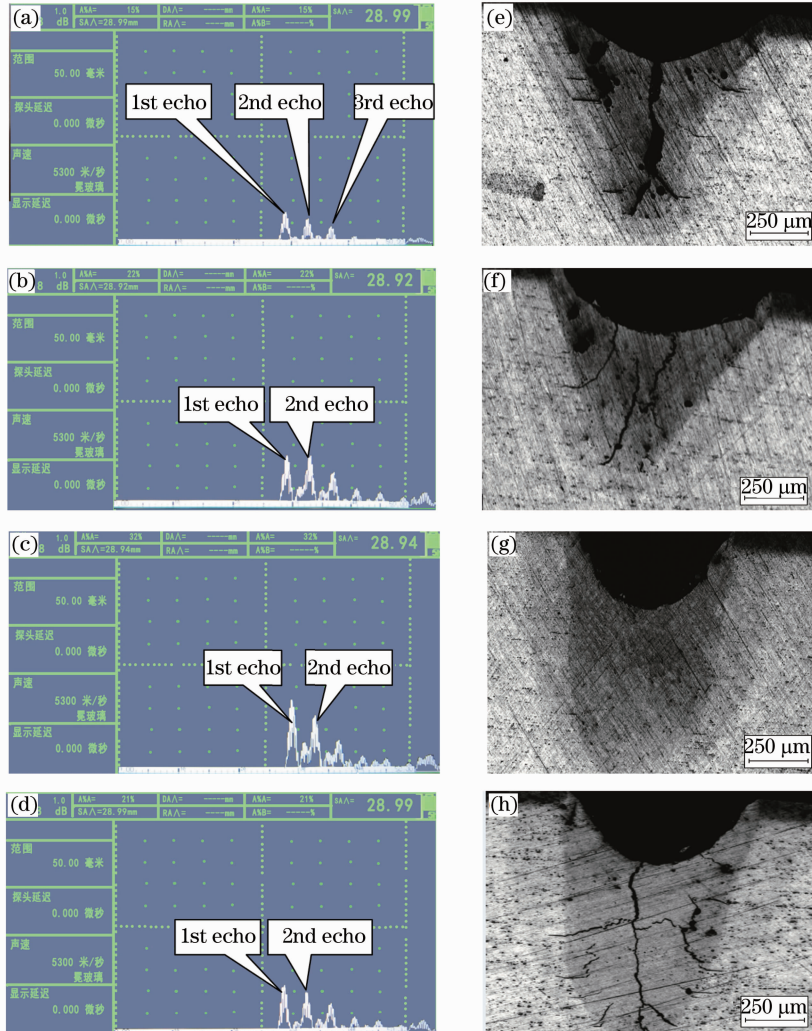


图 1 不同焊接移动速度下试块超声波探伤仪的波形图(a~d)和焊缝截面图(e~f)。

(a),(e) 90 mm/min; (b),(f) 100 mm/min; (c),(g) 110 mm/min; (d),(h) 120 mm/min

Fig. 1 Typical ultrasonic waveforms (a~d) and sectional view of the welding seam (e~f) at different

welding moving speeds. (a),(e) 90 mm/min; (b),(f) 100 mm/min; (c),(g) 110 mm/min; (d),(h) 120 mm/min

从图 1(a)可以看出:超声波的第一次、第二次、第三次回波的波形幅度很低,首波平缓,幅值小,向后延迟,从第三次回波之后出现了回波检测不到的现象,这表明超声波在试块传播中遇到了较大的缺陷,出现了很明显的散射。超声波是具有多种频率成分的机械波,在缺陷试块中时,不同频率成分的超声波的衰减程度不同,其高频部分比低频部分衰减严重,从而使接收波的主频向低频端漂移,漂移幅值与试块的缺陷程度有关。所以,接收波频率实质上是衰减值的一个表征。通过分析主频的漂移情况可辅助判断缺陷的程度,主频愈低,试块的缺陷愈严重<sup>[10]</sup>。从图 1(e)所示焊缝截面图中,也可以发现激光对接焊形成的焊缝截面有许多宽而深的裂纹和缩孔。图 1(b)中第二次回波比第一次回波还要高,而且波形呈折线状,端部较细,表明该试块存在由于残余应力偏大和金属内部组织偏硬引起的冷却焊缝<sup>[11]</sup>,从图 1(f)中可以发现在激光对接焊的热

影响区出现了裂纹,这是由于激光对接焊过程中试件的受热不均匀导致的。图 1(c)中整个波形规则有序,排列紧密,而且超声波的回波清晰可见,相邻两个回波之间的间距相同,回波幅度也比较高,通过图 1(g)所示激光共聚焦显微镜拍摄的焊缝截面图可以发现试块组织形貌平整,没有缺陷,焊接区和热影响区区分明显,均匀过渡,试件受热比较均匀<sup>[12]</sup>。由此得出:超声波回波清晰可见,相邻的回波间距几乎相等,并且多次回波幅值呈规律递减时对应的焊缝没有明显的裂纹和缩孔,焊接质量高。图 1(d)中的波形规则有序,排列紧密,前几个周期回波清晰可见,回波幅度相对较高,但后几个周期波形幅度很低,以至于出现了检测不到的现象,说明超声波在试块中传播遇到了少量的损伤,这是由于激光对接焊表面不平滑产生的。当超声波在缺陷试块中传播时,缺陷的复杂界面使其传播路径复杂化,产生绕射、反射和折射等,最后在接收换能器上以许多相同或不同频率、振幅和相位的机械振动叠加成一个综合的超声波信号,导致波形的畸变<sup>[10]</sup>。波形畸变得越厉害表明缺陷的程度越严重,缺陷范围越大。从图 1(h)所示焊缝截面图中可以发现缺陷比较杂乱无章。

### 3.2 激光器电压对对接焊质量的影响

当激光脉宽为 2 ms,激光正离焦量为 6 mm,脉冲激光频率为 30 Hz,焊接的移动速度为 110 mm/min 保持不变,激光器电压分别为 450、460、470 和 480 V 时,对试块进行激光对接焊试验,采用超声波探伤仪对试块分别进行扫描,结果如图 2 所示。同样地,图 2 也给出了对应的焊缝截面图。

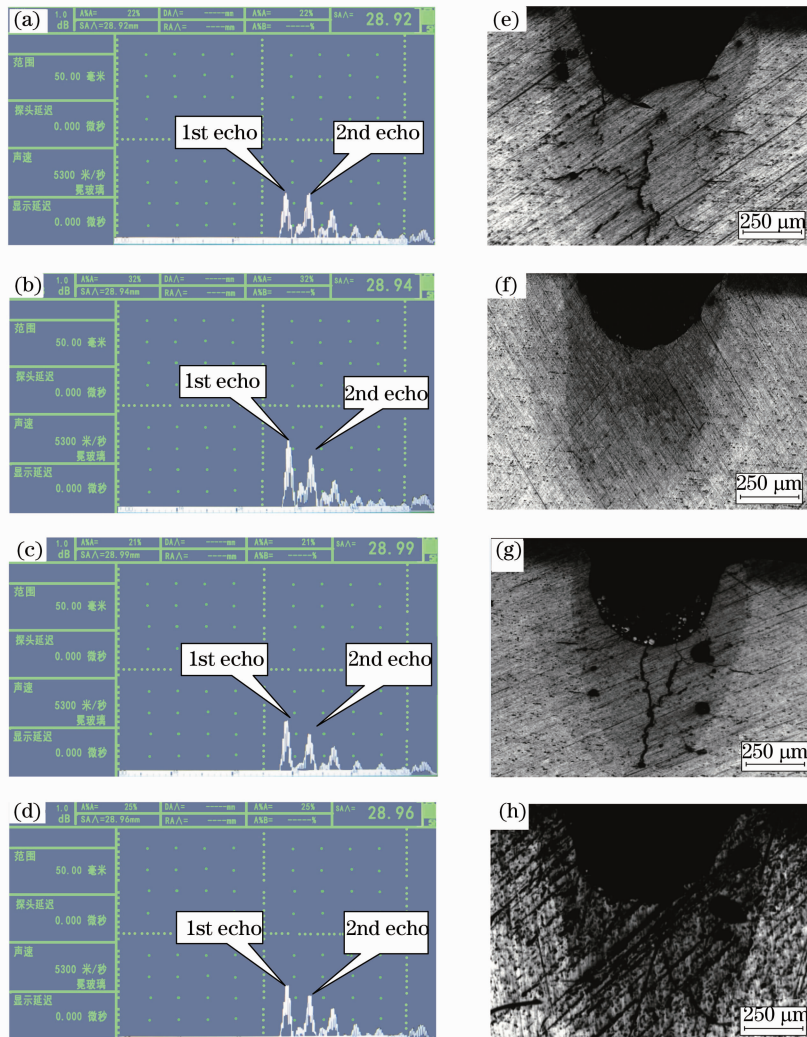


图 2 不同激光器电压下试块的超声波探伤仪波形图(a~d)和焊缝截面图(e~f)。

(a),(e) 450 V; (b),(f) 460 V; (c),(g) 470 V; (d),(h) 480 V

Fig. 2 Typical ultrasonic waveforms (a~d) and sectional view of the welding seam (e~f) at different laser voltages.

(a),(e) 450 V; (b),(f) 460 V; (c),(g) 470 V; (d),(h) 480 V

图 2(a)中第二次回波比第一次回波还要高,而且波形呈折线状,端部较细。这表明该试块存在由于残余应力偏大和金属内部组织偏硬引起的冷却焊缝。从图 2(e)所示的缝截面图中可以发现在激光对接焊的热影响区出现了裂纹,这是由于激光焊接过程中试件的受热不均匀而产生的。图 2(b)中整个波形规则有序,排列紧密,而且超声波的回波清晰可见,回波幅度也比较高,由此可以说明此试块无明显缺陷,焊接质量高。通过图 2(f)的焊缝截面图中可以发现试块组织形貌平整,没有缺陷,焊接区和热影响区区分明显,均匀过渡,试件受热比较均匀。由此得出:超声波回波清晰可见,相邻的回波间距几乎相等,并且多次回波幅值呈规律递减时对应的焊缝没有明显的裂纹和缩孔,焊接质量高。图 2(c)和(d)相比图 2(b)中的回波出现了很大衰减,波形幅度较低而且出现了回波检测不到的现象,说明超声波在试块中出现了较大的散射,焊接中出现了很大的缺陷(如疏松、夹杂和气孔等)。通过图 2(g)和(h)可以发现对应的试块中出现了缺陷,从图 2(g)可以发现试块中出现了裂纹和气孔,而从图 2(h)可以发现试块出现了气孔。

### 3.3 激光离焦量对对接焊质量的影响

当激光脉宽为 2 ms,激光器频率为 30 Hz,激光器电压为 460 V,焊接移动速度为 110 mm/min 保持不变,激光正离焦量分别为 4、5、6 和 7 mm 时,对试件进行激光对接焊试验,采用超声波探伤仪对试块分别进行扫描。所得到的超声波回波波形图以及对应的用聚焦显微镜拍摄的焊缝截面图如图 3 所示。

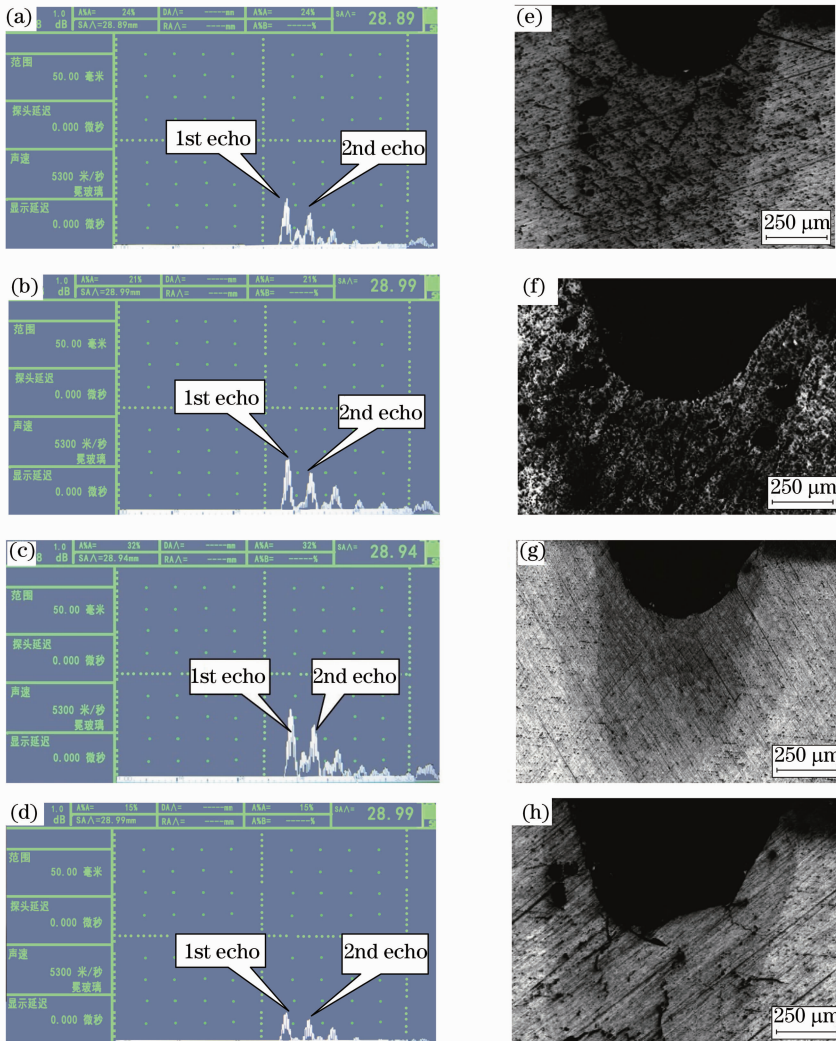


图 3 不同激光离焦量下试块超声波探伤仪的波形图(a~d)和焊缝截面图(e~h)。

(a),(e) 4 mm; (b),(f) 5 mm; (c),(g) 6 mm; (d),(h) 7 mm

Fig. 3 Typical ultrasonic waveforms (a~d) and sectional view of the welding seam (e~h) at different laser defocusing amounts. (a),(e) 4 mm; (b),(f) 5 mm; (c),(g) 6 mm; (d),(h) 7 mm

图 3(a)和(b)中的波形规则有序,排列紧密,前几个周期回波清晰可见,回波幅度相对较高,但后几个周期波形幅度很低,甚至出现了检测不到的现象。这说明超声波在试块中传播遇到了少量的损伤,可能是由于激光对接焊产生了不平滑的表面。通过观察图 3(e)和(f)所示激光共焦显微镜拍摄的摄焊缝截面图,可以发现试块的截面中出现了气孔等缺陷。图 3(c)中整个波形规则有序,排列紧密,而且超声波的回波清晰可见,回波幅度也比较高,由此可以说明此试块无明显裂纹和缩孔,焊接质量高;通过图 3(g)可以发现试块组织形貌平整,没有缺陷,焊接区和热影响区区分明显,均匀过渡,试件受热比较均匀。由此得出:超声波回波清晰可见,相邻的回波间距几乎相等,并且多次回波幅值呈规律递减时对应的焊缝没有明显的裂纹和缩孔,焊接质量高。图 3(d)相比图 3(b)中的波形,回波出现了衰减而且波形幅度较低,并且出现了回波检测不到的现象,说明超声波在传播过程中遇到较大的损耗,出现了超声波能量的散射现象。因此,焊接试块内部出现了较大的缺陷。从图 3(h)可以发现在试块焊接区出现了多条裂纹和气孔,这导致超声波在这些界面传播时产生了很大的损耗,从而在波形图上面显示的波幅较低。

## 4 结 论

1) 建立了 7075-T6 铝合金激光对接焊截面金相组织和超声波探伤回波之间的关联,研究表明超声波回波清晰可见,相邻的回波间距几乎相等,并且多次回波幅值呈规律递减时对应的焊缝没有明显的裂纹和缩孔,焊接质量高。

2) 通过试验,获得了 2 ms 激光脉宽和 30 Hz 脉冲激光频率条件下最佳的 7075-T6 铝合金激光对接焊工艺参数为:焊接移动速度 110 mm/min、激光正离焦量 6 mm 和激光器电压 460 V。

## 参 考 文 献

- 1 E. L. Guen, R. Fabbro, M. Carin *et al.*. Analysis of hybrid Nd:YAG laser-MAG arc welding processes[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2011, **43**(7): 1155~1166
- 2 M. M. Khan, L. Romoli, M. Fiaschi *et al.*. Experimental design approach to the process parameter optimization for laser welding of martensitic stainless steels in a constrained overlap configuration[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2011, **43**(1): 158~172
- 3 Mei Lifang, Chen Genyu, Jin Xiangzhong *et al.*. Study on fiber laser overlap-welding of automobile aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2091~2097  
梅丽芳,陈根余,金湘中等. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 2091~2097
- 4 Cui Li, He Dingyong, Li Xiaoyan *et al.*. Effects of welding direction on weld shape of fiber laser-MIG hybrid welded titanium alloys[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0103002  
崔 丽,贺定勇,李晓延等. 焊接方向对光纤激光-MIG 复合焊接钛合金焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(1): 0103002
- 5 Naoya Kasai, Akira Takada, Katsuhiko Fukuoka *et al.*. Quantitative investigation of a standard test shim for magnetic particle testing[J]. *NDT & E International*, 2011, **44**(5): 421~426
- 6 Takahiro Noda, Shogo Tsuda, Motoyuki Mori. Determination of the phosphorus content in potato starch using an energy-dispersive X-ray fluorescence method[J]. *Food Chemistry*, 2006, **96**(4): 632~637
- 7 Yuichi Sekine, Hitoshi Soyama. Evaluation of the surface of alloy tool steel treated by cavitation shotless peening using an eddy current method[J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2009, **203**(16): 2254~2259
- 8 R. Ulusay, Z. A. Erguler. Needle penetration test: evaluation of its performance and possible uses in predicting strength of weak and soft rocks[J]. *Engineering Geology*, 2012, **149-150**: 47~56
- 9 Reinhardt Kotzé, Johan Wiklund, Rainer Haldenwang. Optimisation of pulsed ultrasonic velocimetry system and transducer technology for industrial applications[J]. *Ultrasonics*, 2013, **53**(2): 459~469
- 10 Shoupeng Song, Peiwen Que. Wavelet based noise suppression technique and its application to ultrasonic flaw detection[J]. *Ultrasonics*, 2006, **44**(2): 188~193
- 11 A. M. Hassan, S. W. Jones. Non-destructive testing of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): a feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, **35**: 361~367
- 12 X. D. Gao, S. J. Na. Detection of weld position and seam tracking based on Kalman filtering of weld pool images[J]. *J. Manufacturing Systems*, 2005, **24**(1): 1~12