

# 连续激光焊接 Fe-Ni 合金工艺参数对焊缝形貌的影响

吴东江 张天武 马广义 刘士博 范 聪 金洙吉

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要** 采用连续 Nd:YAG 激光对 Fe-Ni(质量分数为 36%)合金进行单道扫描实验。借助金相显微镜观察焊缝截面形貌的几何特征。分析工艺参数(激光功率、扫描速度、离焦量、焊接角度以及热输入量)变化对焊缝截面几何特征的影响。结果表明:较大的负离焦量将导致大负余高的出现,减薄材料,不利于激光自熔焊;在离焦量不变的情况下,激光功率的提高较之减小扫描速度更有助于增大熔深;在使用热输入量(功率/扫描速度)作为复合表征量分析焊缝形貌时,应考虑上述激光功率与扫描速度之间的关系带来的影响。

**关键词** 激光技术;激光焊接;Fe-Ni 合金;深熔焊;工艺参数;焊缝形貌

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0303003

## Influence of Welding Parameters on the Morphology of Fe-Ni Alloy with Continuous Wave YAG Laser

Wu Dongjiang Zhang Tianwu Ma Guangyi Liu Shibo Fan Cong Jin Zhuji

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract** Continuous wave (CW) Nd:YAG laser beam bead-on-plate welding of Fe-Ni (36%, mass fraction) alloy is carried out. The morphology of the cross section is analyzed by optical microscope. The influence of welding parameters (laser power, scanning speed, defocusing amount, welding angle and heat input) on the morphology of the cross section is studied. The results indicate that large negative focusing position will weaken the weldments, consequently, is of disadvantage to self-fusible welding. And the increase of laser power is more helpful to improve welding penetration than slowing down welding speed when the focusing position is fixed. The influence of the relationship between laser power and welding speed should be considered when heat input (laser power/welding speed) is used to characterize the morphology of the weld.

**Key words** laser technique; laser welding; Fe-Ni alloy; penetration welding; welding parameters; welding morphology

**OCIS codes** 000.2658; 140.3390; 350.3390

## 1 引 言

Fe-Ni 合金由于其较低的热膨胀系数被广泛应用于精密仪器、电子工业、航空航天等领域。随着该合金在各个行业中的应用更加广泛,Fe-Ni 合金的焊接技术变得十分重要。

国外对该合金的研究开展得较早,日本 Matsuda 等<sup>[1]</sup>用 TIG 焊对 Fe-Ni 合金 1.5 mm 厚薄

板进行了焊接实验,研究表明裂纹易发生的温度区间为 800 °C~1300 °C 以及发生裂纹的类型为失塑性裂纹。美国的 Corbacho 等<sup>[2]</sup>使用 TIG 焊对 Fe-Ni 合金(4~8 mm)板材进行了单道扫描实验,认为低热量输入的焊接方法有利于防止由晶粒过度粗化带来的问题以及二次热裂纹。日本 Hongoh 等<sup>[3]</sup>使用 TIG 焊焊接方法对 9.5 mm 厚 Fe-Ni 合金板材进

收稿日期: 2012-10-13; 收到修改稿日期: 2012-11-14

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724307)资助课题。

作者简介: 吴东江(1964—),男,博士,教授,主要从事激光精密制造以及先进制造技术等方面的研究。

E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

行多道填丝(直径 1.2 mm)焊接试验,使用添加 Nb 元素的焊丝消除了焊接裂纹。美国学者 Jasthi 等<sup>[4]</sup>对 12.7 mm 厚 Fe-Ni 合金板材发表了相关报道,该实验采用搅拌摩擦焊对接接头,研究了工艺参数对焊缝组织、焊缝形貌的影响,发现焊后接头硬度、热膨胀系数与基材相比基本一致。国内对该合金研究开展相对较晚,大连理工大学吴东江等<sup>[5,6]</sup>对 Fe-Ni 合金 2 mm 以下薄板脉冲激光焊接工艺进行了研究,得到了 0.5,0.8,2 mm 的无裂纹焊缝以及最佳工艺参数范围。上海交通大学大学倪加明等<sup>[7]</sup>研究了不同焊接接头的连续激光高速焊接裂纹敏感性,结果表明,搭接接头相对于对接接头能有效降低热裂纹敏感性,但并未深入讨论工艺参数的影响。综合国内外研究现状可知,Fe-Ni 合金有较高的热裂纹倾向,而激光焊接该合金较之电弧焊更易获得无裂纹焊缝,但目前的研究局限于脉冲激光焊接以及焊接接头的裂纹敏感性等方面,而对于工业中应用

广泛的连续激光深熔焊焊接工艺参数对厚板焊缝形貌影响的系统研究报道较少。

本文利用 Nd:YAG 激光器对 Fe-Ni(质量分数为 36%)合金进行了单道扫描实验,观察并测量了焊缝截面形貌的几何特征;改进了焊接保护环境,使实际应用中应予避免的焊接缺陷得到改善,并研究了焊接参数与焊缝几何特征之间的关系。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 实验材料

实验采用 Fe-Ni 系低膨胀合金材料 8 mm 板材,20 °C ~ 100 °C 平均线膨胀系数约为  $0.75 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。该合金塑性良好,导热性差[导热系数  $k \approx 4.63 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ],约为 45 钢的 1/10。熔化温度在 1430 °C ~ 1450 °C 之间,退火处理后为单相奥氏体组织。材料化学成分如表 1 所示。

表 1 Fe-Ni 合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Fe-Ni alloy (mass fraction, %)

Element	Si	Mn	P	S	Ni	Fe
Content	0.6	0.33	0.014	0.007	35.26	63.63

### 2.2 实验设备

实验所用焊接设备为英国 GSI LUMONICS 公司的 JK1002 型连续(CW) Nd:YAG 固体激光器,激光输出波长为 1064 nm,最高输出功率为 1200 W,强度空间分布为高斯多模。激光头透镜焦距为 200 mm,最小光斑直径为 0.6 mm。机床采用 RESEM 公司五轴机床,定位精度为 0.001 mm。

### 2.3 实验方法

在 Fe-Ni 合金板上使用激光器进行单道扫描实验,焊接参数依照激光器的有效工作范围以及深熔焊接发生条件选取。实验前表面均经磨削处理并用乙醇擦拭去除油污。焊接参数如表 2 所示。

表 2 激光焊接工艺参数

Table 2 Variation range of laser welding parameters

Parameter	Range
Laser power /W	700~1000
Welding speed /(mm/min)	50~120
Focusing position /mm	0, -0.5, -1, -1.5
Welding angle /(°)	15,20,25

焊后试样沿横截面剖开,经粗磨、精磨、抛光后,使用王水试剂腐蚀晶相,腐蚀时间 10~20 s。腐蚀后,使用 Olympus 公司 MX40F 光学显微镜对焊道进行熔深、熔宽以及金相检测。焊道截面形貌几何特征如图 1 所示,焊缝呈指型,激光功率为 1000 W,

扫描速度为 50 mm/min,离焦量为 -1.5 mm,焊接角度为 15°。其中,  $h$  代表熔深,  $w$  代表熔宽,  $h'$  代表余高(图中所示为本实验参数范围内出现的典型负余高特征,即焊道表面凹陷低于基材边缘;反之为正)。本文采用氩气保护盒与侧吹喷嘴联合使用的方式来达到对 Fe-Ni 合金焊接的保护作用,如图 2 所示。

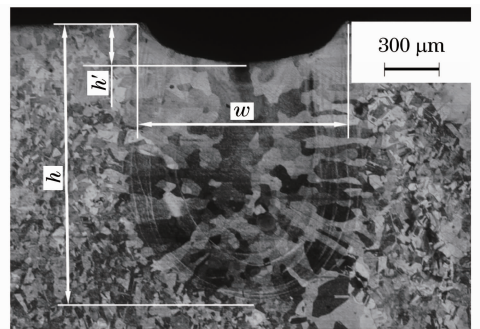


图 1 焊缝形貌几何特征示意图

Fig. 1 Schematic of characterization of welding cross section

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 焊接角度对焊缝形貌的影响

为避免激光在材料表面的反射作用对光学系统产生不良影响,焊接过程中应采用一定的焊接角度,定义为激光束与被作用材料表面法线的夹角。实验

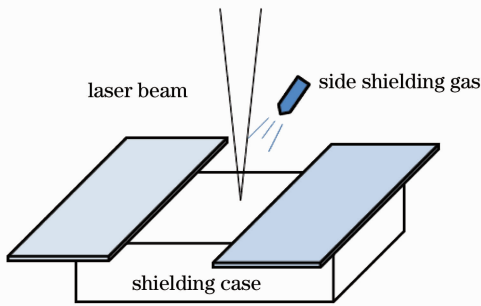


图 2 保护气体装置示意图

Fig. 2 Schematic of shielding gas device

采用单因素法,在保证其他参数不变的情况下,只改

变焊接角度。图 3 是在离焦量为 0,水平方向扫描速度 120 mm/min,焊接功率 1000 W 的条件下,改变焊接角度对熔深  $h$ 、熔宽  $w$  以及深宽比  $h/w$  的影响。从图 3 中可以看出,焊接熔深、深宽比随激光束与材料法线夹角变大而减小;熔宽随夹角增大而增大;负余高也随角度增加逐渐减小。随着焊接角度的增加,激光光斑沿焊接方向被拉长,光斑面积随之增大,再加之焦点位置变化范围的加大,从而导致作用于材料表面的激光功率密度下降<sup>[8]</sup>,减少了焊接熔深。同样由于功率密度的下降,材料的蒸发汽化作用也得到减弱,使负余高逐渐缩小。而熔宽的加宽则可能同样与激光光斑面积的增大有关。

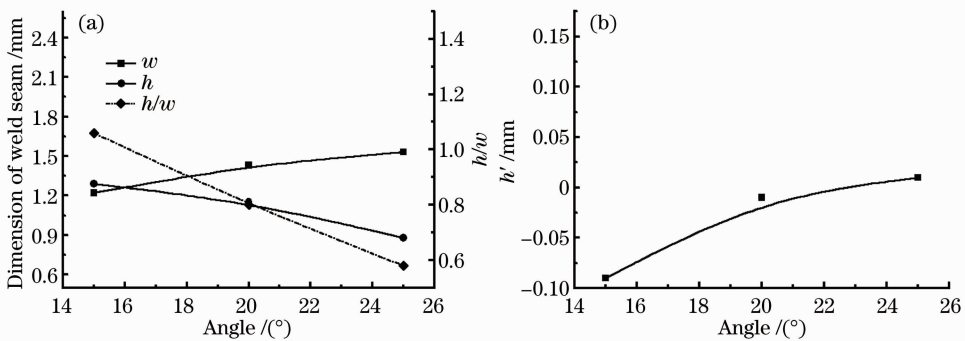


图 3 焊接角度对焊缝形貌的影响。(a)对熔深、熔宽、深宽比的影响;(b)对余高量的影响

Fig. 3 Effect of welding angle on the weld shape. (a) Effect on penetration depth, width and aspect ratio; (b) effect on underfill

### 3.2 离焦量对焊缝形貌的影响

激光焊接通常需要一定的离焦量,对于较厚板材深熔焊焊接一般采用 0 或负离焦量。图 4 是在扫描速度为 50 mm/min,焊接功率为 1000 W,激光束与材料表面法线夹角为 15°的条件下,焊缝几何形貌随离焦量变化的趋势。

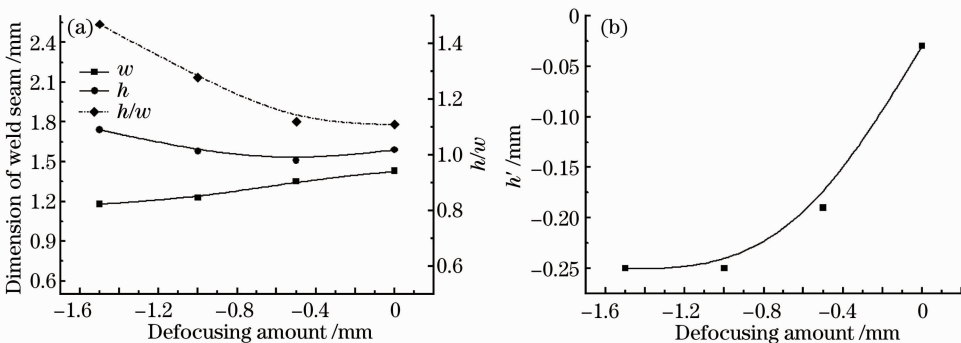


图 4 离焦量对焊缝形貌的影响。(a)对熔深、熔宽、深宽比的影响;(b)对余高量的影响

Fig. 4 Effect of focusing position on the weld shape. (a) Effect on penetration depth, width and aspect ratio; (b) effect on underfill

通过观察图 1 和图 4 以及其他参数下焊缝形貌可以发现,焊缝呈指型;熔深、深宽比均随激光焦点深入程度的增加而逐渐增大;熔宽随焦点深入的增加而减小。随着离焦量的增大,造成激光焦平面的

下移,由于透镜焦深较大,导致激光与材料作用表面功率密度下降不大,而在材料内部功率密度加大,从而导致熔深的加深<sup>[9]</sup>。但是,较大的离焦量会伴随着较大负余高的产生[如图 4(b)所示],同样是作用

于在材料内部能量密度的增加,导致材料蒸发汽化和飞溅现象更为剧烈。小孔的存在以及汽化作用的增强,使激光在深度方向热作用被强化,而由于汽化带来的热量的散失,则可能使激光在宽度方向的热作用被弱化,导致熔宽减小。由此可知,在一定的范围内增大负离焦,有利于增加焊缝的深宽比,从而提高激光的利用效率。但是,在深熔焊接 Fe-Ni(质量

分数为 36%)合金且不填充焊接材料的情况下,为了使材料厚度不得到减弱,不宜采用较大的负离焦。

### 3.3 激光功率、扫描速度对焊缝形貌的影响

表 3 为离焦量为 0,激光束与材料表面法线夹角为 15°的条件下分别采用不同的激光功率  $P$  和不同的焊接速度  $v$  组合的实验结果。

表 3 不同功率、速度下焊道形貌特征

Table 3 Characterization of weld seam at different laser powers and welding speeds

Welding speed / (mm/min)	Laser power / W	Heat input / (J/mm)	Width / mm	Penetration / mm	Aspect ratio	Underfill / mm
50	750	900	1.28	1.08	0.84	0.08
64	750	703	1.09	1.01	0.93	0.05
92	750	489	1.05	1.04	0.99	0.08
120	750	375	1.01	0.9	0.89	0.05
50	800	960	1.31	1.27	0.97	0.05
64	800	750	1.2	1.26	1.05	0.01
92	800	522	1.16	1.14	0.98	0.04
120	800	400	1.03	0.99	0.96	0.03
50	900	1080	1.35	1.41	1.04	0.03
64	900	844	1.22	1.31	1.07	-0.02
92	900	587	1.22	1.2	0.98	-0.04
120	900	450	1.19	1.13	0.95	-0.02
50	1000	1200	1.43	1.59	1.11	-0.04
92	1000	652	1.24	1.41	1.14	-0.17
120	1000	500	1.22	1.29	1.06	-0.09

通过表 3 可以得到,随着激光功率的增大,Fe-Ni(质量分数为 36%)合金材料的熔深熔宽呈增大趋势。当激光功率增大时,作用于材料的功率密度增大,小孔内蒸发作用得到强化,由于激光束在小孔内壁经多次反射的聚焦效应,焊接深度得到进一步加深,因此较易形成深宽比较大的焊缝。但是较大的功率密度将会导致材料的过量蒸发,当材料蒸发量大于熔池对流等原因造成的小孔后方熔池材料的堆积量时,负余高将会出现,并且随着功率的升高,在不同速度下余高的变化范围较大。在本实验参数范围内,仅减少扫描速度的情况下,熔深、熔宽逐渐增大,焊缝深宽比呈上升后下降的趋势。可见单纯依赖扫描速度降低对热输入量的提高,而不增加作用于材料的功率密度,熔宽增长的速率最终将超过熔深加大的速率。图 5 为根据表 3 中熔深、深宽比、余高量实验数据确定的参数分布图,以便可以依照不同的焊接要求选择参数范围。图中把参数分为 4 个区域: I、IV 两区倾向于获得较大熔深,深宽比大于等于 1 的焊缝形貌; II、III 两区则易获得熔深较小,深宽比小于等于 1 的焊缝;同时 III、IV 两区为

正余高区; I、II 两区则较易产生负余高。从参数分布情况的整体来看,热输入较大的区域较易获得大熔深(I 区左边部分、IV);低功率密度区域(III、IV)则有利于正余高的产生。在熔深满足要求且不希望材料削弱的情况下,应首选 III、IV 区;在强调更高的焊接效率的而不考虑材料减少的情况下,应首选 I 区; II 区则介于这几者之间。

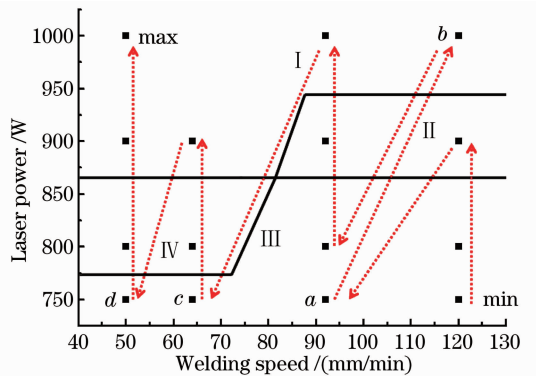


图 5 激光功率与扫描速度焊接参数分布图  
Fig. 5 Distribution of parameters between laser power and welding speed

### 3.4 热输入量( $P/v$ )对焊缝形貌的影响

熔化一定质量的金属,所需的热量,可由下式确定<sup>[10]</sup>:

$$Q = m[c(T_m - T_0) + L_m], \quad (1)$$

式中  $T_m$ 、 $T_0$  分别为熔点和初始温度,  $L_m$  表示相变潜热,  $c$  为材料比热容。将式中  $m$  使用相应的激光与材料相对运动的参数替代可得:

$$Dh = \frac{Q/t}{\rho v [c(T_m - T_0) + L_m]}, \quad (2)$$

式中  $Q/t$  为熔化相应体积金属所需激光功率,  $D$  为熔池直径,  $\rho$  为材料密度。当材料确定时(2)式可简化为

$$Dh = K \frac{P}{v}, \quad (3)$$

由(3)式可知,熔深与熔宽乘积(截面面积)正比于热输入量。

参考上述公式及以往研究均表明,热输入量作为一个复合参数,直接影响了焊缝形貌的特点<sup>[11~13]</sup>。如图6所示,Fe-Ni(质量分数为36%)合金熔深、熔宽随热输入量的增大而增加,熔深与熔宽乘积增大的趋势也与(3)式的描述相近,但是其中存在突变点(如图6中a、b、c、d处所示),使整条曲线出现波动,呈阶段性上升后突然下降的趋势,图中实验数据见表3。

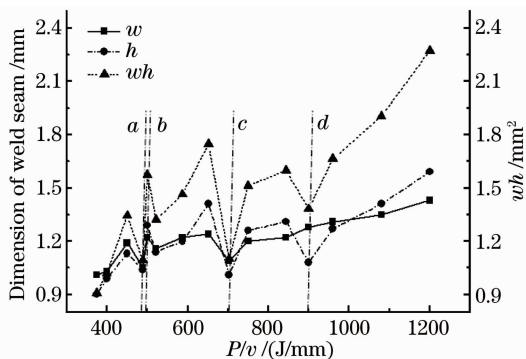


图6 热输入量对熔深熔宽的影响

Fig. 6 Effects of heat input on the penetration depth and width

分析后发现,突变点均出现在激光功率和扫描速度同时增大和减小处,即单因素变量  $v$  变化区间的交接处,热输入量由小向大变化及图6中突变点a、b、c、d在所选参数中分布如图5所示。与突变点相邻热输入量点对比可知,焊道形状均呈指型,结合实验过程观察可以判断其中并不涉及焊接模式的转变。并且由于保护环境相同,焊接过程也不存在对流原因造成熔深的加强。将图5中a、c、d三点及其

前一点的熔深熔宽在图6中比较可知,当扫描速度较之激光功率下降比例较大时,热输入量增加,但熔深熔宽呈突然减小态势;对比上文得出的扫描速度对熔深熔宽的影响规律可推知,当功率的下降比例不变时,速度减小同比例的情况下,熔深熔宽将进一步减小。即在热输入量且离焦量不变的情况下,增大激光功率较之降低速度,对熔深<sup>[14]</sup>、熔宽以及截面面积产生更大的影响。由此可见,增大激光功率密度比延长单位长度激光作用时间对焊道形貌改变的作用更强,更有利于大熔深的获得。因此,如果单纯考虑提高焊接生产效率,应该选择较大的连续激光功率。

## 4 结 论

本文对Fe-Ni(质量分数为36%)合金8 mm板材开展CW YAG激光深熔焊接单道扫描实验。通过分析焊接角度、焦点位置、焊接功率以及扫描速度的影响,研究了不同参数条件下焊缝形貌几何特征的变化规律,得到以下结论:

1) 焊接角度改变了激光作用在材料表面的功率密度,从而对焊道形貌几何特征产生影响。焊接中应使用较小的焊接角度以满足较大焊接熔深的需求。

2) 焊接过程应选取适当的离焦量,当激光离焦量为负且绝对值较大时,易出现较大负余高,使材料厚度得到减弱。为避免其带来的不良影响,在实际焊接中不宜采用大负离焦量。

3) 提高焊接功率带来的激光功率密度的提高较之降低扫描速度产生的单位长度作用时间的加强对熔深熔宽影响更大。因此使用热输入量作为Fe-Ni(质量分数为36%)合金复合表征量对熔深熔宽的变化趋势进行判断,应考虑上述影响。

4) 激光功率与热输入量同时取较大值时焊道熔深较大,但易出现负余高;同时取小值时虽然有助于产生正余高但是熔深、深宽比相对较小。因此在不同的焊接要求下应选择不同功率-速度区域的焊接参数,以获得所需的焊缝形貌。

## 参 考 文 献

- 1 F. Matsuda, H. Nakagawa, S. Minehisa *et al.*. Weldability of Fe-36%Ni (report 1): hot cracking with cross-bead test [J]. *Trans. JWRI*, 1980, **9**(2): 197~204
- 2 José L. Corbacho, Juan C. Suárez, Franeiseo Molleda. Grain coarsening and boundary migration during welding of invar Fe-36Ni alloy [J]. *Mater. Characterization*, 1998, **41**(1): 27~34

- 3 Susumu Hongoh, Shuji Yamamoto, Kazuhiro Ogawa *et al.*. Development of LNG piping using invar alloy (Ⅲ): Multi-pass GTAW process for thick joint of Fe-36%Ni alloy[J]. *J. High Pressure Inst. Jpn.*, 2003, **41**(4): 160~167
- 4 Bharat K. Jasthi, William J. Arbegast, Stanley M. Howard. Thermal expansion coefficient and mechanical properties of friction stir welded invar (Fe-36%Ni)[J]. *J. Mater. Engng. & Performance*, 2009, **18**(7): 925~934
- 5 Wu Dongjiang, Yin Bo, Zhang Weizhe *et al.*. Nd:YAG laser beam welding invar36 alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1773~1777  
吴东江, 尹波, 张维哲等. Nd:YAG 激光焊接殷钢材料的工艺研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1773~1777
- 6 Wu Dongjiang, Yin Bo, Zhou Qiuju *et al.*. Nd:YAG laser beam welding invar36 alloy sheet [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(3): 557~562  
吴东江, 尹波, 周秋菊等. 用 Nd:YAG 激光焊接殷钢薄板材料[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(3): 557~562
- 7 Ni Jiaming, Li Zhuguo, Wu Yixiong. Hot tearing susceptibility of high speed laser welding invar sheet[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0403001  
倪加明, 李铸国, 吴毅雄. 殷瓦薄板高速激光焊接的热裂纹敏感性[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0403001
- 8 Chen Genyu, Kang Bin, Zhang Yi *et al.*. Effects of incident angle on welding performance of fiber laser butt welding of high-strength automobile steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0103008  
陈根余, 康斌, 张屹等. 光纤激光入射角对高强钢对接焊接性能的影响[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0103008
- 9 Chen Hong, Wu Shikai, Zhang Zhengwei *et al.*. The effect of laser beam characteristics on laser processing [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(6): 834~841  
陈虹, 吴世凯, 张正伟等. 高功率激光光束特性对激光加工的影响[J]. *光学技术*, 2006, **32**(6): 834~841
- 10 Hana Chmelieková, Hana Šebestová. Pulsed Laser Welding [OL]. <http://www.intechopen.com/books/nd-yag-laser/pulsed-laser-welding>. [2013-01-05]
- 11 Zhu Chuanyun, Wang Zhenjia. Selecting focus position and laser weld ability of H62 brass[J]. *Hot Working Technology*, 2008, **37**(7): 58~60  
朱传运, 王振家. 焦点位置的确定和 H62 黄铜激光焊接性的研究[J]. *热加工工艺*, 2008, **37**(7): 58~60
- 12 Wang Jiachun, Wang Xizhe, Hui Songxiao. Research of linear heat input and laser focus position for laser welding HE130 titanium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 179~184  
王家淳, 王希哲, 惠松晓. HE130 合金激光焊接线能量与焦点位置研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 179~184
- 13 P. Sathiya, M. Y. Abdul Jaleel. Measurement of the bead profile and microstructural characterization of a CO<sub>2</sub> laser welded AISI 904L super austenitic stainless steel [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2010, **42**(6): 960~968
- 14 Feng Weiqi, Zhang Yunfeng, Tao Wang *et al.*. Dissimilar metals combination of superalloy/stainless steel in T-shape by laser penetration welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 1003003  
冯威琦, 张云丰, 陶汪等. 高温合金/不锈钢异种材料 T 型接头激光穿透焊工艺研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 1003003

栏目编辑: 宋梅梅