

文章编号 1004-924X(2009)03-0557-06

用 Nd:YAG 激光焊接殷钢薄板材料

吴东江, 尹 波, 周秋菊, 王续跃, 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:用 Nd:YAG 脉冲激光作为焊接热源, 对殷钢材料 Invar36 分别进行了平板单道焊接试验和对焊试验, 分析了工艺参数(激光功率、焊接速度、脉冲宽度和离焦量)变化对焊缝的表面形貌、熔宽以及熔透性的影响。检测了 0.85 mm 厚的殷钢薄板对焊接头的硬度、成分以及拉伸强度。结果表明:激光功率和脉宽是影响焊缝熔深、熔宽和热影响区面积的主要因素;扫描速度对焊缝表面的鱼鳞状条纹间距影响尤为明显;离焦量主要影响焊缝的宽度和熔透性;合理匹配工艺参数能够实现 0.85 mm 厚度薄板的对焊, 并且获得形貌良好的焊缝。焊缝的组织成分没有发生明显变化, 拉伸强度和基体强度相当, 显微硬度略低于基体硬度。

关键词:Invar36 殷钢;激光焊接;对焊;熔宽;Nd:YAG 激光器

中图分类号:TG456.7 **文献标识码:**A

Nd:YAG Laser beam welding invar36 alloy sheet

WU Dong-jiang, YIN Bo, ZHOU Qiu-ju, WANG Xu-yue, JIN Zhu-ji

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

Abstract: A plate-welding test and a butt-welding test for Invar 36 alloy were carried out using Nd:YAG pulsed laser as welding heat source. The effects of process parameters(laser power, welding speed, pulse duration and defocus distance) on the morphology of welding joint, welding width and the penetration were analyzed and the hardness, composition and tensile strength of the fusion zone for butt-welding of 0.85 mm thick Invar sheets were tested. The results indicated that the main factors affecting the weld bead penetration, weld width and Heat Affect Zone(HAZ) are laser power and pulse duration. Moreover, the welding speed effects on the fish-scale spacing and the defocus distance on the weld bead penetration and weld width mainly. Experimental results also indicate that selecting appropriate process parameters can realize the butt-weld for the 0.85 mm thick Invar sheets in good welding modality. The composition of the welding-line has no obviously change, its tensile strength is equal to the base body and its hardness is appreciably lower than that of the base body.

Key words: Invar36 alloy; laser welding; butt-welding; weld width; Nd:YAG laser

1 引言

殷钢材料是 1897 年 C. E. Guillaume 为大地测量应用而发现的一种低膨胀系数的合金。100 多年来殷钢材料得到了不断地发展,满足了不同环境下对低膨胀率合金的使用需求^[1-2]。Invar36(64 %Fe; 36 %Ni, 质量分数)是最典型的 Fe-Ni 系低膨胀合金,应用非常广泛。近年来,Invar36 的应用领域已经从传统的精密仪器领域向电子工业和特殊结构材料领域拓展^[3],已成功应用于彩色显象管的荫罩钢带,横拼双金属弹簧片,电子枪零件,印刷线路板 CIC 复合材料等。在特殊结构材料领域的使用包括:液化石油气(LNG)储气罐,长距离电力传输线,相控天线中天线形变控制设备^[4],大型飞机复合材料的模具,特别是新一代航空航天设备中的复合材料零件的模具等^[5-6]。

随着殷钢材料在电子工业及国防科技中的应用日益广泛,殷钢合金的焊接技术也变得十分重要。目前,文献涉及的焊接殷钢材料的方法主要为气体保护金属极电弧焊(GMAW)和埋弧焊,该工艺热输入量高,工件变形和热影响区较大,易产生热裂纹,对焊丝的 S、P 含量要求十分苛刻,尤其是 S 含量必须严格控制在 0.002 % 以下^[3,7],而焊丝的填充会对殷钢材料引入杂质成分,破坏材料的低膨胀性能,使材料失去使用价值。激光焊接与上述方法相比具有聚焦光斑功率密度高、热输入量低、焊缝窄、热影响区小、焊接变形小、焊接速度快、不需要填充焊丝等优点^[7],因此非常适合热裂倾向大的殷钢材料的焊接。其中 Nd:YAG 激光以其波长短、吸收率高以及可用光纤传输,易于实现加工过程的自动化等优点而广泛应用于焊接生产中。

目前,国内外激光焊接殷钢材料的相关研究报导很少。本文利用 0~550 W 连续可调的 Nd:YAG 脉冲激光器对殷钢材料 Invar36 进行单道平板焊接试验和对焊试验,研究激光工艺参数变化对焊缝形貌以及熔透性、熔宽的影响。通过对焊缝区域的组织成分和性能的检测,探索激光焊接殷钢材料 Invar36 的合理工艺参数,为殷钢材

料的广泛应用提供技术支持。

2 试验条件及方法

2.1 试验材料

试验材料采用殷钢 Invar36,该材料常温下具有很低的线热膨胀系数($\alpha_{20\sim 100\text{ }^\circ\text{C}} \leq 1.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)。此外,该合金塑性良好,性能稳定,导热性差(导热系数 $\kappa=4.63\text{ W/m}\cdot\text{K}$),约为 45 号钢($\kappa=50.2\text{ W/m}\cdot\text{K}$)的 1/10。其熔化温度为 1 430~1 450 $^\circ\text{C}$,退火状态下为单相奥氏体组织,化学成分如表 1 所示。

表 1 Invar36 合金的化学成分(%)
Tab.1 Chemical compositions of Invar36 alloy

成分	C	P	S	Si	Mn	Ni	Fe
含量	≤ 0.05	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.2	0.2~0.6	35.0~37.0	余量

2.2 试验设备

试验所用焊接设备为 JK701H 型 Nd:YAG 固体毫秒脉冲激光器,波长 1.064 μm ,功率 0~550 W 连续可调。数控系统为 FANUC 四轴联动,定位精度 $< 0.03\text{ mm}$,重复定位精度 $\pm 0.003\text{ mm}$ 。

2.3 试验方法

焊接试验前,使用线切割方法将 Invar36 切割成尺寸规格 65 mm \times 30 mm \times 0.85 mm 的平板试样和 10 mm \times 15 mm \times 0.85 mm 的对焊试样,焊接时先在 65 mm \times 30 mm \times 0.85 mm 平板上进行单道扫描焊接,取得合理参数后再取 10 mm \times 15 mm \times 0.85 mm 平板进行对焊试验。为了减少焊接缺陷,对接头端面先用砂纸打磨,再用酒精清洗。

表 2 激光焊接的工艺参数值
Tab.2 Variation range of welding parameters

选项	参数值
激光功率(W)	110,130,150,170
脉宽(ms)	5,6,8,10
扫描速度(mm/min)	100,120,140,160,180
光斑直径(mm)	0.96~1.13
透镜焦距(mm)	120

焊接过程中工艺参数的选择范围见表2。辅助气体采用压缩空气,压力在0.1 MPa,辅助气体的主要作用是保护聚焦透镜免受金属蒸汽污染,同时增大焊缝表面的对流,加快冷却速度。

3 试验结果及分析

3.1 激光功率对殷钢材料焊缝的影响

本文主要采用单因素法,通过改变激光设备的一种参数进行试验,从材料的熔化状况研究激光的阈值条件。表3是在离焦量为3 mm,脉宽为8 ms,频率为20 Hz,扫描速度为120 mm/min条件下,改变激光功率对单道平板扫描焊缝的熔宽和熔透性的影响。从表3可以看出随着激光功率从110 W增大到170 W,单道平板扫描焊缝熔宽逐渐变宽,焊缝由未焊透过渡到焊透,说明熔深也是随功率的增大而加深。焊接过程中焊缝表面无裂纹及焊瘤等缺陷,焊缝的鱼鳞状条纹分布均匀,条纹间距随能量变化不明显,热影响区大小受激光功率变化的影响不大。

表3 功率变化对焊缝的影响

Tab. 3 Effects of laser powers on welding lines

激光功率 (W)	焊缝宽度 (mm)	焊接特征	焊接效果
110	1.02	未熔透 下表面没有焊接纹理	差
130	1.05	未熔透 下表面焊接纹理不清晰	一般
150	1.08	熔透 上下表面焊接纹理清晰	好
170	1.10	熔透 上下表面焊接纹理清晰	好

3.2 激光脉宽对殷钢材料焊缝的影响

脉宽是脉冲激光焊接的重要参数之一,脉冲激光焊接试验功率密度为:

$$P_s = \frac{4E}{\pi d^2 t_p} \quad (1)$$

其中 P_s 为激光功率密度(W/cm^2), E 为单脉冲能量(J), d 为光斑直径(cm), t_p 为脉宽(s)。由公式得出增大脉宽激光功率密度降低。

试验数据表明(表4),在离焦量为3 mm,功率为150 W,频率为20 Hz,扫描速度为

120 mm/min参数条件下,脉宽从2 ms增大到8 ms使得单道平板扫描焊缝从未熔透过渡到熔透,焊缝宽度的变化不大,在6 ms的时候焊缝宽度有略微的降低。焊缝鱼鳞状条纹均匀,脉宽增大对条纹间距的影响不明显,但是脉宽越大,热影响区越大,这是因为在激光功率密度超过殷钢材料熔化阈值的条件下,增大脉宽虽然会降低功率密度但却延长了加热时间。因此,在保证热影响区允许的情况下,可以适当增大脉宽,提高殷钢材料焊接质量的稳定性。

表4 脉宽变化对焊缝的影响

Tab. 4 Effects of pulse durations on welding lines

脉宽(ms)	焊缝宽度(mm)	焊接特征	焊接效果
2	0.96	未熔透 表面溅射严重	差
4	1.07	熔透 下表面纹理不清晰	一般
6	1.06	熔透 上下表面纹理清晰	好
8	1.08	熔透 上下表面纹理清晰	好

3.3 扫描速度对殷钢材料激光焊接的影响

表5是在功率为150 W,离焦量为3 mm,脉宽为6 ms,频率为20 Hz条件下,改变扫描速度(80~180 mm/min),焊缝的熔宽和焊缝形貌的变化。从表5可以看出随着扫描速度的增加,熔宽基本呈减小趋势;焊缝从熔透时的塌边严重过渡到下表面纹理不清晰,表明熔深也是呈减小趋势。但是在对焊试验中发现对于0.85 mm厚度殷钢材料来说,虽然降低焊接速度可以增大熔深,但是

表5 扫描速度对焊缝的影响

Tab. 5 Effects of welding speeds on welding lines

焊接速度 (mm/min)	焊缝宽度 (mm)	焊接特征	焊接效果
80	1.09	熔透 塌边严重	差
120	1.06	熔透 上下表面焊接纹理清晰	好
160	1.05	熔透 下表面焊接纹理不清晰	一般
180	1.05	熔透 下表面焊接纹理不清晰	一般

焊接速度不能过低,否则容易在焊接过程中产生热裂纹,甚至焊穿。随着焊接速度的降低,焊缝的鱼鳞状条纹越发不明显。因此,激光焊接殷钢材料必须根据熔深和熔宽等要求选择合适的焊接速度。

3.4 离焦量对殷钢材料激光焊接的影响

激光是方向性很好的光源但并非平行光,激光能量在平面上的分布为高斯函数,存在最小光斑处,也就是焦平面的位置。激光焊接通常需要一定的离焦量,对于焊接薄板材料宜采用正离焦^[8-9]。

表 6 显示,随着离焦量的减小,缝宽逐渐变小,熔透性增强,熔深增加。离焦量减小,光斑变小,光斑覆盖的熔融区大小直接影响焊缝的宽度;但是功率密度随光斑的变小而增大,使在相同时间内金属的熔化量增大,增加了熔透性。焊接中选择合适的离焦量可以保证光斑能力分布的相对均匀,同时也可以得到适当的功率密度。

表 6 离焦量对焊缝的影响

Tab. 6 Effects of defocusing distances on welding lines

离焦量 (mm)	焊缝宽度 (mm)	焊接特征	焊接效果
4	1.13	熔透,下表面焊接纹理不清晰	一般
3	1.06	熔透,上下表面焊接纹理清晰	好
2	1.04	熔透,上下表面焊接纹理清晰,但表面溅射颗粒多	一般

3.5 激光对焊 0.85 mm 殷钢薄板的组织和性能

根据上述试验结果,对 0.85 mm 厚度的 Invar36 薄板进行对焊试验选取的工艺参数为:功率为 150~170 W、脉宽为 6~8 ms、频率为 20 Hz

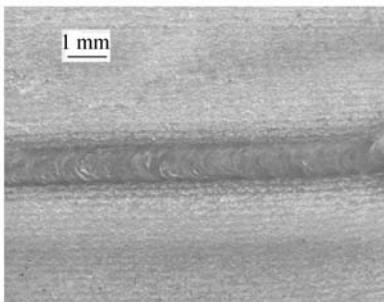


图 1 对焊试样的宏观图像

Fig. 1 Macrostructure of butt-weld

离焦量为 3 mm、扫描速度为 120 mm/min。图 1 所示为对焊试样光学显微镜图片。

3.5.1 X 射线衍射检测

图 2 和图 3 分别为基体和焊缝区的 X 射线衍射检测结果。殷钢材料的基体只有 Fe_{0.64}Ni_{0.36}衍射峰,即基体的相组成为单一的奥氏体相;焊缝区存在 Fe_{0.64}Ni_{0.36}和 Fe₂O₃两种衍射峰,其中 Fe₂O₃的衍射峰较弱。这是因为焊接过程中采用压缩空气作为保护气,导致焊缝表面产生了轻微的氧化。因此,殷钢焊接时要选择合适的保护气。

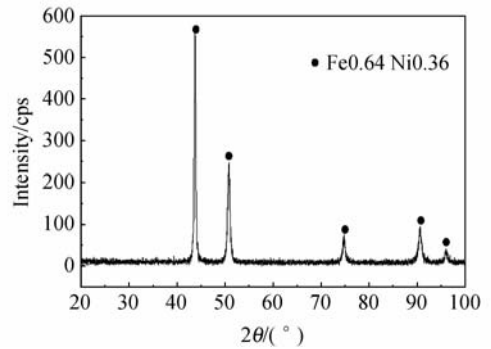


图 2 基体的 X 射线衍射图像

Fig. 2 XRD pattern of Invar36 alloy base body

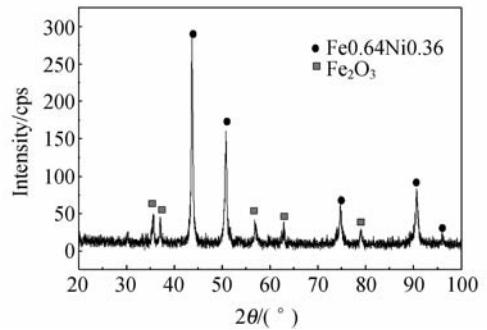


图 3 焊缝区的 X 射线衍射图像

Fig. 3 XRD pattern of Invar36 alloy welding line

3.5.2 显微硬度检测

根据 GB4342-84 标准要求进行显微维氏硬度检测,试样检测前进行抛光处理,相邻测试点距离为 0.5 mm(图 4)。图中只显示了中间 5 个点的位置,其余各点对称的分布在焊缝两侧。

检测结果(图 5)显示,显微硬度自焊缝区经热影响区到母材的过程中呈增加的趋势,但差别并不大。这与焊缝部位的奥氏体晶粒粗化有关,奥氏体晶粒长大会造成晶粒抵抗塑性变形的抗力

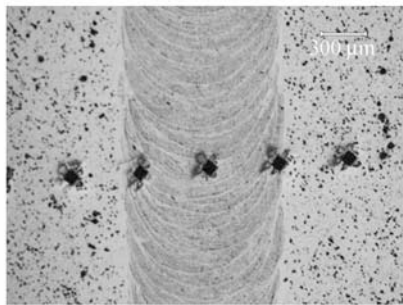


图4 显微硬度测试位置

Fig. 4 Indentation situation in microhardness test

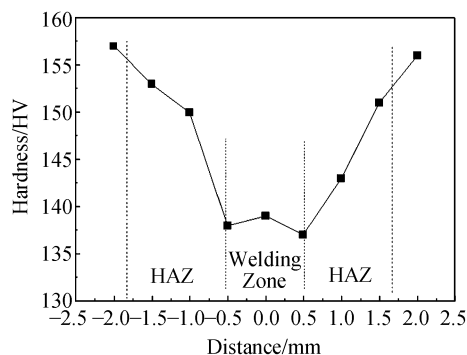


图5 显微硬度检测结果

Fig. 5 Microhardness test result

减小,硬度因而有所下降^[8]。

3.5.3 拉伸试验检测

根据 GB/T228-2002 标准要求对焊接试样进行拉伸试验。拉伸的速度为 0.7 mm/min。

为了降低试验的误差,制作了两组试样^[9]。试样的拉伸强度分别为 347.426 MPa 和 340.8 MPa,考虑到对焊时殷钢薄板会有轻微的应力变形,认为试验的数据是一致的。图 6 为对焊接试

样的拉伸断裂图片,拉伸断裂的部位均不在焊缝区域,这表示经过激光焊接的焊缝在外力拉伸作用下抵抗破坏的能力高于基体。

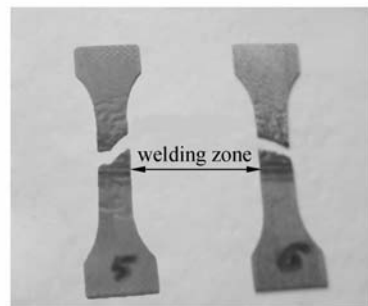


图6 拉伸试验试样的断裂图片

Fig. 6 Fracture situations of butt-weld samples

4 结 论

使用脉冲 Nd:YAG 激光作为焊接热源可以实现对厚度为 0.85 mm 殷钢薄板的对焊。焊缝的熔深和熔宽随着激光功率密度和脉宽的增大而增加;激光的扫描速度是影响焊缝表面的形貌的主要因素;焊接中要选取适当的离焦量。对殷钢 Invar36 采用低功率激光焊接时,工艺参数之间需要合理的配合才能获得焊缝窄和热影响区小的焊缝。本试验过程中,当功率为 150~170 W、脉宽为 6~8 ms、频率为 20 Hz、离焦量为 3 mm 和扫描速度为 120 mm/min 时,焊缝较为理想。焊缝区的组织成分除氧化外和基体没有区别;焊缝区的显微硬度略低于基体硬度;焊缝的抗拉伸强度高于基体。

参考文献:

- [1] MASAYUKI S. Invar alloys[J]. *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 1996(1):340-348.
- [2] TALASHI S, TADAHIKO F, JUNG-HWAN H, et al.. Multifunctional Alloys Obtained via a Dislocation-Free Plastic Deformation Mechanism [J]. *Science*, 2003, 300:464-467.
- [3] CORBACHO J L, SUÁREZ J C, MOLLEDA F. Grain coarsening and boundary migration during

welding of invar Fe-36Ni alloy[J]. *Materials characterization*, 1998, 41:27-34.

- [4] 朱海明. 新材料、新结构在某相控阵天线结构设计中的应用[J]. *电子机械工程*, 2006, 22(1):30-32.
ZHU H M. Application of New Materials and New Structures to Phased Array Antenna [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2006, 22(1):30-32. (in Chinese)
- [5] SMITH R J, LEWIS G J, YATES D H. Development and application of nickel alloys in aerospace engineering[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace*

Technology, 2001, 73(2):138-147.

- [6] 邓波, 寒光炜, 冯涤. 低膨胀高温合金的发展及在航空航天业的应用[J]. 航空材料学报, 2003, 23(增1):244-249.

DENG B, HAN G W, FENG D. Development of low thermal expansion superalloys and their application in aerospace[J]. *Journal of aeronautical materials*, 2003, 23(s1):244-249. (in Chinese)

- [7] 关振中. 激光加工技术手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998:109-132.

GUAN ZH ZH. *Manual for Laser Processing Parameter* [M]. Beijing: Press of Chinese Measurement, 1998:109-132. (in Chinese)

- [8] ZHOU Q J, WU D J, JIN ZH J. Low power Nd: YAG laser beam welding Invar36 alloy[C]. *Proc. AEMS07. Nagoya Japan: 28-30 Nov.*, 2007: 161-164.

- [9] 周清林, 乔及森, 陈剑虹, 等. 铝合金 CO₂ 激光与 TIG 薄板焊接接头力学性能分析[J]. 焊接学报, 2006, 27(8):63-66.

ZHOU Q L, QIAO J S, CHEN J H, *et al.*. Mechanical properties of CO₂-laser and TIG aluminium alloy welded joint[J]. *Transactions of the China welding institution*, 2006, 27(8):63-66. (in Chinese)

作者简介:



吴东江(1964—),男,山东人,教授,博士,2000年于中科院长春光学精密机械与物理所获博士学位,主要从事精密与特种加工领域的研究。E-mail: djwudut@dlut.edu.cn



王续跃(1960—),男,辽宁大连人,博士,副教授,主要从事激光精密加工方面的研究。E-mail: wbzzd@dlut.edu.cn



尹波(1983—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事激光精密焊接方面的研究。E-mail: qing61983@hotmail.com



金洙吉(1967—),男,黑龙江林口人,教授,博士生导师,1995年于哈尔滨工业大学机械学专业获得博士学位,主要研究方向为精密超精密加工理论与技术、特种加工及其控制技术。E-mail: kimsg@dlut.edu.cn



周秋菊(1979—),女,辽宁葫芦岛人,硕士,主要从事激光精密焊接方面的研究。E-mail: zqjeseveny@hotmail.com