

文章编号: 0258-7025(2008)11-1773-05

Nd:YAG 激光焊接殷钢材料的工艺研究

吴东江 尹 波 张维哲 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 利用 Nd:YAG 脉冲激光作为焊接热源,对殷钢材料 Invar36 进行了对焊实验,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。对 2 mm 厚度的殷钢对焊接头的硬度变化进行了检测,同时对比分析了焊缝和基体的金相组织。结果表明,激光功率和脉宽是影响焊缝熔深、熔宽和热影响区大小的主要因素,激光焊接速度的选择范围相对较小,离焦量主要影响焊缝的宽度和熔透性,焊缝的组织成分没有发生明显变化,显微硬度略低于基体,焊缝处的金相组织为奥氏体柱状晶,并且呈现奥氏体晶粒粗化现象。

关键词 激光技术;对焊;深熔焊;殷钢

中图分类号 TN249; TG456.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20083511.1773

Nd:YAG Laser Beam Welding Invar36 Alloy

Wu Dongjiang Yin Bo Zhang Weizhe Jin Zhuji

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

Abstract Nd:YAG laser beam butt-welding of invar36 alloy is carried out. The influence of the welding line's surface, bead penetration and width to the laser parameter is investigated with plate-welding. The composition and hardness of the fusion zone is investigated with the butt-welding of the thickness of 2 mm. The result indicated that: laser power and pulse duration are the main factors which influence the weld bead penetration, weld width and heat affect zone (HAZ). There is a narrow selection range of the welding speed. The defocusing distance mainly affects the weld bead penetration and weld width. The composition of the welding-line has no obviously change, the hardness is appreciably lower than base body. The crystallographic orientation of the welding line had columnar crystals appeared and austenite growth.

Key words laser technique; butt-welding; deep penetration welding; Invar alloy

1 引 言

殷钢材料是 1897 年 C. E. Guilleaume 为大地测量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的发展,满足了不同环境下对低膨胀合金的应用需求^[1,2]。Invar36[(w)64Fe:(w)36Ni]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。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、大型飞机复合材料的模具、相控天线中控制天线形变设备^[4],特别是新一代航空航天事业中的零件^[5,6],要求当先进的复合材料在中等温度下凝固时模子应保持很狭窄的尺寸公差,殷钢材料可满足这一要求。

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,产生热裂纹倾向性增大,并且对焊丝的 S、P 含量要求十分苛刻,尤其

收稿日期:2008-09-16;收到修改稿日期:2008-10-09

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2009CB724307)和辽宁省自然科学基金(20062178)资助课题。

作者简介:吴东江(1964—),男,教授,主要从事激光微细加工技术方面的研究。E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

是 S 含量必须严格控制在 0.002% 以下^[3,7],而且焊丝的填充会对殷钢材料引入杂质成分,破坏了材料的低膨胀性能,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^[7,8],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道很少^[9]。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 进行对焊实验,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 实验条件及方法

2.1 实验材料

实验材料采用殷钢 Invar36,该材料常温下具有很低的线热膨胀系数($\alpha_{20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}} \leq 1.8 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)。此外,该合金塑性良好,性能稳定,导热性差[导热系数 $K = 4.63 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$],是 45 号钢材 [$K = 50.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] 的 1/10 左右。其熔化温度范围为 1430~1450 °C,退火状态下为单相奥氏体组织,其化学成分如表 1 所示。

表 1 Invar36 合金的化学成分(%)

Table 1 Chemical composition of Invar36 alloy

C	P	S	Si	Mn	Ni	Fe
≤ 0.05	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.2	0.2~0.6	35.0~37.0	balanced

2.2 实验和检测设备

实验所用焊接设备为 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 $\pm 0.003 \text{ mm}$ 。使用 Olympus 光学显微镜进行熔透性和熔宽以及金相检测,利用 XRD-6000 型 X 射线衍射仪进行物相分析,硬度检测使用 HV-1000 型显微硬度测试仪。

2.3 实验方法

焊接实验前,使用线切割方法将 Invar36 板材切割成尺寸规格为 15 mm \times 10 mm \times 2 mm 的平板试样。为了减少焊接缺陷,先用砂纸打磨对焊接头端面,再用丙酮清洗。

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^[10],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气污染,同时增大焊缝表面的对流,加快冷却速度。

表 2 激光焊接的工艺参数

Table 2 Variation range of welding parameters

Option	Parameter
Laser power /W	350,400,450,500
Pulse duration /ms	6,7,8,9
Welding speed /(mm/min)	20,25,30,35
Lens focus /mm	120

3 实验结果及分析

3.1 激光功率对殷钢材料焊缝的影响

采用单因素法,每组实验只改变激光设备的一种参数,从材料的熔化状况和表面形貌研究激光的阈值条件。图 1 是在离焦量(激光聚焦点离工件表面的距离为离焦量,焦点在工件表面上方为正离焦,在表面下方为负离焦)0 mm,脉宽 8 ms,频率 40 Hz,扫描速度 30 mm/min 条件下,改变激光功率对焊缝的熔宽和熔透性的影响。从图 1 和图 2 可以看出随着激光功率从 350 W 增大到 500 W 的过程中,焊缝熔宽(从 2.10 mm 增大到 2.48 mm)和热影响区逐渐变宽,焊缝背面由未焊透过渡到焊透,说明熔深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,但随着激光能量的增大,焊缝区出现凹陷的现象,而且焊缝两端塌边现象也变得更加严重。

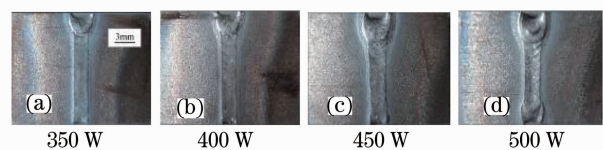


图 1 激光功率变化时的焊缝正面形貌

Fig. 1 Top morphology of the welding line at different laser power

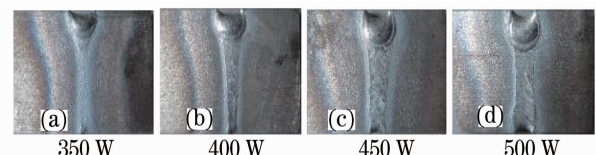


图 2 激光功率变化时的焊缝背面形貌

Fig. 2 Bottom morphology of the welding line at different laser power

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,脉冲激光焊接实验功率密度为

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

式中 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(1)式知增大脉宽会导致激光功率密度的降低。

图 3 和图 4 表明,在离焦量 0 mm,功率 450 W,频率 40 Hz,扫描速度 30 mm/min 参数条件下,脉宽从 6 ms 增大到 9 ms 的过程中焊缝背面从未熔透过渡到熔透,焊缝宽度(从 2.01 mm 增大到 2.16 mm)的变化不大,脉宽为 6 ms 时焊缝宽度明显较窄,并且焊缝也没有熔透。焊缝鱼鳞状条纹均匀,脉宽增大对条纹间距的影响不明显,但是随着脉宽增大,热影响区明显越大,这是由于增大脉宽虽然降低了功率密度但却延长了加热时间。因此,激光深熔焊时在功率密度和热影响区允许的范围之内,可以适当增大脉宽,提高殷钢材料焊接质量的稳定性。

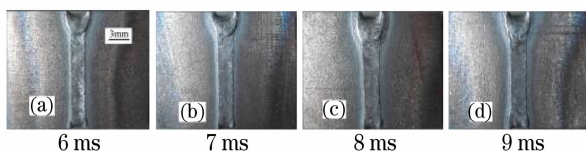


图 3 激光脉宽变化时的焊缝正面形貌

Fig. 3 Top morphology of the welding line at different pulse duration

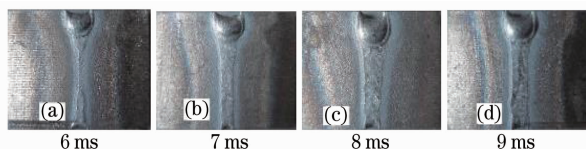


图 4 激光脉宽变化时的焊缝背面形貌

Fig. 4 Bottom morphology of the welding line at different pulse duration

3.3 扫描速度对殷钢材料激光焊接的影响

图 5 和图 6 是在功率 450 W,离焦量 -2 mm,脉宽 7 ms 频率 40 Hz 时,改变扫描速度(20~35 mm/min)对焊缝的熔宽和形貌的变化。从图 5 和图 6 可以看出随着扫描速度的增加,熔宽(从 2.56 mm 减小到 2.14 mm)呈减小趋势,焊缝两边的塌边现象和背面的焊缝宽度也呈减小趋势。由于焊接速度变化范围

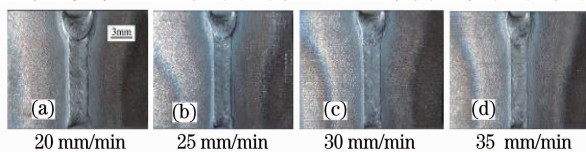


图 5 焊接速度变化时的焊缝正面形貌

Fig. 5 Top morphology of the welding line at different welding speed

较小,焊缝形貌变化并不大。在实验中发现对于 2 mm 厚度殷钢材料来说降低焊接速度可以增大熔深,但是焊接速度过低时容易在焊接过程中产生热裂纹,并且引起严重的塌边现象。而焊接速度过快时会出现焊缝不能被熔透的现象。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。

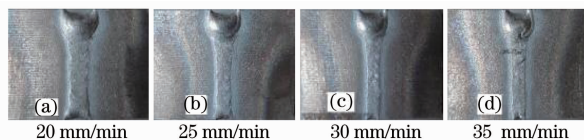


图 6 焊接速度变化时的焊缝背面形貌

Fig. 6 Bottom morphology of the welding line at different welding speed

3.4 离焦量对殷钢材料激光焊接的影响

激光焊接通常需要一定的离焦量,对于焊接厚板材料宜采用负离焦^[7]。图 7 和图 8 是在功率 450 W、脉宽 7 ms,频率 40 Hz,扫描速度 30 mm/min 的条件下,改变离焦量(2~-4 mm)时焊缝的熔宽和焊缝形貌的变化图片。图 7 和图 8 显示随着离焦量的减小,缝宽(从 1.84 mm 增大到 2.72 mm)逐渐变宽,熔透性增强,熔深增加。焊接时,正离焦出现焊缝没有被完全熔透现象,所以对深熔焊需选择负离焦量。但是当负离焦量较大时(如 -4 mm),焊缝背面出现变窄的趋势,故需选取适当的负离焦量。

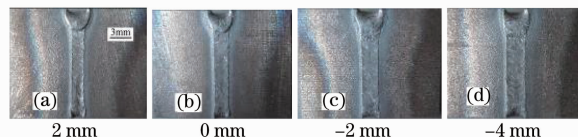


图 7 离焦量变化时焊缝正面的形貌图片

Fig. 7 Top morphology of the welding line at different defocusing distance

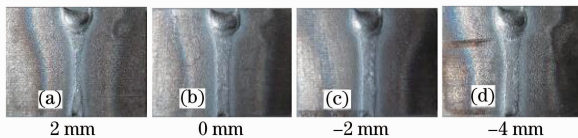


图 8 离焦量变化时焊缝背面的形貌图片

Fig. 8 Bottom morphology of the welding line at different defocusing distance

根据上述实验结果,对 2 mm 厚度的 Invar36 材料进行对焊实验选取的合理工艺参数为:功率 400~450 W,脉宽 7~8 ms,频率 40 Hz,离焦量 -2 mm,扫描速度 30~35 mm/min。

3.5 激光对焊殷钢材料的组织和性能影响

3.5.1 X 射线衍射检测

图 9 和图 10 分别为基体和焊缝区的 X 射线衍射

检测结果,衍射检测采用 Cu 靶。殷钢材料的基体和焊缝都只有 $\text{Fe}_{0.64}\text{Ni}_{0.36}$ 衍射峰,即相组成为单一的 $\text{Fe}_{0.64}\text{Ni}_{0.36}$ 奥氏体相,说明焊接过程没有对材料的物相组成产生影响。

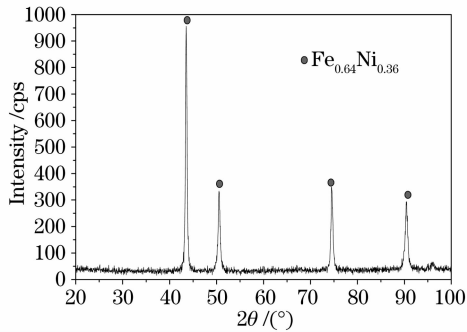


图 9 基体的 X 射线衍射图像

Fig. 9 XRD pattern of Invar36 alloy base body

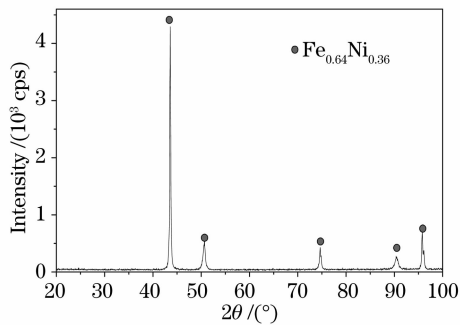


图 10 焊缝区的 X 射线衍射图像

Fig. 10 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,自焊缝中心位置起向两边每隔距离 0.5 mm 为一个测试点,共取了 17 个测试点。

检测结果(图 11)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,即焊接区域硬度下降。这与焊缝部位的奥氏体晶粒粗化有关,奥氏体

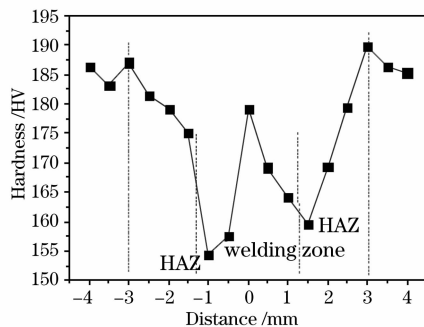


图 11 显微硬度检测结果

Fig. 11 Microhardness test result

晶粒长大造成晶粒抵抗塑性变形的抗力减小,硬度因而有所下降^[9]。从图 12 可以看出位于焊缝中心位置处的晶粒要比周围的晶粒细化,这也是显微硬度测试中焊缝中心位置附近硬度会高一些的原因。

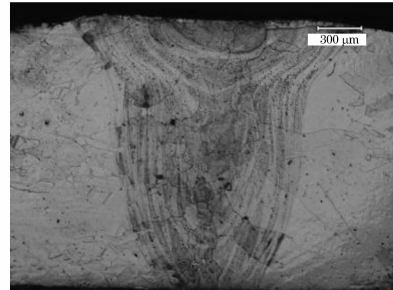


图 12 完整焊缝的形貌

Fig. 12 Feature of whole butt welding joint

3.5.3 金相检测

通过对图 13 和图 14 的比较,可以明显看出焊缝处的晶粒度要比基体的粗化,这是因为殷钢材料本身的热导率低,散热能力差,导致了焊缝处奥氏体晶粒粗化。奥氏体晶粒的粗化容易使析出物集中在较少的晶界上,形成较厚的晶间偏析夹层,这将导致焊缝冷却过程中在拉应力的作用下沿晶界拉裂,形成热裂纹。

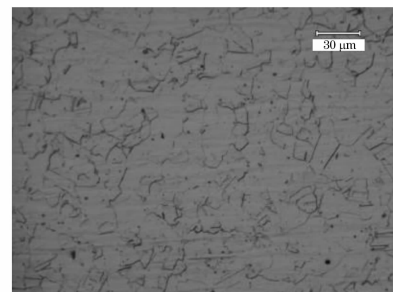


图 13 基体的金相组织

Fig. 13 Microstructure of Invar alloy base body

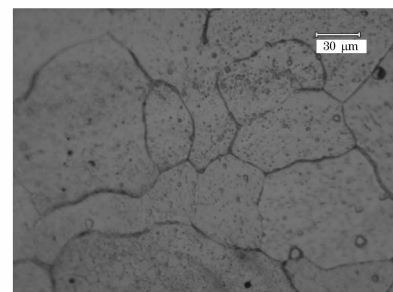


图 14 焊缝处的金相组织

Fig. 14 Microstructure of butt-welding joint

从图 12 中的焊缝整体形貌可以看出,焊缝区域具备激光深熔焊的特征^[11],具有明显的束腰和穿透深度。从金相图可以看出位于焊缝和基体附近主要

为柱状奥氏体晶,在向焊缝中心位置过渡中晶相逐渐由柱状晶转变成为等轴晶。这是由于焊缝冷却时焊缝边缘靠近基体部位的热量能够以更快的速度散失,在基体和焊缝之间形成了较大的温度梯度,促进了柱状晶的成核和生长;而在向焊缝中心过渡的区域温度梯度会逐渐变小,这就为等轴晶的形成和生长创造了条件。

4 结 论

1) 使用脉冲 Nd:YAG 激光作为焊接热源可以实现厚度为 2 mm 殷钢材料的对焊。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。

2) 对殷钢 Invar36 采用激光焊接时,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。本实验过程中,当功率 400~450 W,脉宽 7~8 ms,频率 40 Hz,离焦量 -2 mm,扫描速度 30~35 mm/min 时,焊缝较为理想。

3) 焊缝区的物相组成和基体没有区别,焊缝区的显微硬度略低于基体硬度,焊缝处的金相组织为奥氏体柱状晶,并且呈现奥氏体晶粒粗化现象。

参 考 文 献

- Masayuki Shiga. Invar alloys[J]. *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 1996, **1**: 340~348
- Talashi Saito, Tadahiko Furuta, Jung-Hwan Hwang *et al.*. Multifunctional alloys obtained via a dislocation-free plastic deformation mechanism[J]. *Science*, 2003, **300**: 464~467
- José L. Corbacho, Juan C. Suárez, Francisco Molleda. Grain coarsening and boundary migration during welding of invar Fe-36Ni alloy[J]. *Materials Characterization*, 1998, **41**: 27~34
- Zhu Haiming. Application of new materials and new structures to phased array antenna[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2006, **22**(1): 30~32
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
- R. J. Smith, G. J. Lewi, D. H. Yates. Development and application of nickel alloys in aerospace engineering[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2001, **73**(2): 138~147
- Deng Bo, Han Guangwei, Feng Di. Development of low thermal expansion superalloys and their application in aerospace[J]. *J. Aeronautical Materials*, 2003, **23**(s1): 244~249
邓波, 寒光伟, 冯 滔. 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**(增刊): 244~249
- Guan Zhenzhong. Manual for Laser Processing Parameter [M]. Beijing: Press of Chinese Measurement, 1998. 109~132
关振中. *激光加工技术手册*[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998. 109~132
- Ruisheng Huang, Liming Liu, Fan Zhang. Influences of laser in low power YAG laser-MAG hybrid welding process[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 47~50
- Zhou Qiuju, Wu Dongjiang, Jin Zhuji *et al.*. Low power Nd:YAG laser beam welding Invar36 alloy[C]. *Proc. AEMS07*, 2007. 161~164
- Hong Lei, Wu Gang, Chen Wuzhu. Influence of shielding gas flow on welding quality for CO₂ laser welding of aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1571~1576
洪 蕾, 吴 钢, 陈武柱. 保护气流对 CO₂ 激光焊接铝合金的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1571~1576
- Han Ning, Zhang Huanzhen, Xiao Rongshi. Threshold characterization for laser penetration welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 311~315
韩 宁, 张寰臻, 肖荣诗. 激光深熔焊接阈值表征及特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 311~315