

文章编号: 0258-7025(2009)05-1251-05

厚板高强钢激光填丝多层焊工艺

李俐群 陶 汪 朱先亮

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 以 16 mm 厚低合金高强钢 11CrNi3MnMoV 为实验材料, 研究了不同能量输入模式下厚板激光填丝多层焊的焊接工艺特性。设计了窄间隙坡口形式, 实现了双光束激光填丝的单道多层焊。通过对比单、双光束填丝焊的焊缝成形特征, 确定气孔、未熔合为高强钢厚板激光多层焊的主要缺陷, 双光束可有效提高焊接稳定性、降低焊缝气孔, 同时明显提高焊丝对中性; 辅助层间保温与热丝技术可有效解决未熔合与层间束腰过小问题。双光束热丝焊的接头抗拉强度可达母材 97% 以上, 为填丝多层焊的优选工艺。焊缝断口呈现为韧窝型剪切断裂。

关键词 激光技术; 激光多层焊; 厚板高强钢; 双光束; 窄间隙; 热丝

中图分类号 TN249; TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1251

Wire Filling Laser Multilayer Welding of High Strength Steel Thick Plate

Li Liqun Tao Wang Zhu Xianliang

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Characteristics of laser multilayer welding of 16-mm thick high strength steel 11CrNi3MnMoV with filler metal in different energy input modes are studied. A narrow gap groove is designed, and dual beam single pass multilayer laser welding with filler metal is carried out. By comparing the weld forming characteristics of single with dual beam laser welding with filler metal, porosity and incomplete fusion is regarded as the main defect of the joint. Moreover, the welding stability and alignment state of wire is obviously improved when the dual beam is used. At the same time, the welding defect, i. e. porosity, is impressed sharply. In addition, problems of incomplete fusion and narrow girdling are solved in the case of combining interbedded heat preservation and hot wire technology. As an optimized welding technology, the tensile strength of the joint processed by dual beam laser welding with hot wire can come up to 97% of matrix metal. Dimple shear fracture is the main failure mode at the fracture surface

Key words laser technique; laser multilayer welding; high strength steel thick plate; dual laser beam; narrow gap; hot wire.

1 引 言

激光焊由于具有功率密度高、热输入小、热影响区窄、焊接变形小、焊接速度快和易于实现自动化等优点, 在焊接生产中具有很大的应用潜力^[1~4]。采用激光焊接高强钢可以细化高强钢焊接接头的晶粒, 提高接头的抗冷、热裂纹能力, 但由于激光焊接冷却速度很快, 易产生焊缝凝固裂纹、热影响区(HAZ)裂纹和软化等问题。

采用填丝焊可在一定程度上改变焊缝区的成分

和组织, 降低接头的硬度, 控制裂纹的产生^[5]。而激光填丝多层焊则常常用来完成中小功率激光的厚板焊接或大厚板的焊接。梅汉华等^[6]利用 6 kW CO₂ 激光器对厚度为 15 mm 和 25 mm 的钢板进行了激光填丝多层焊实验, 结果表明, 采用填充焊丝激光焊接工艺不仅降低了激光焊接对工件坡口加工精度和接头装配精度的要求, 改善了焊缝冶金性能, 而且整个焊缝深宽比可达(5:1)~(7:1), 热影响区范围减小, 有利于降低热输入, 改善接头质量。Riva 工

收稿日期: 2008-06-24; 收到修改稿日期: 2008-09-05

作者简介: 李俐群(1970-), 女, 副教授, 博士, 主要从事铝、钛合金激光焊接技术、激光焊接过程热力学行为分析、激光弯曲成形技术研究。E-mail: liliquan@hit.edu.cn

学院应用 15 kW 激光器进行激光多层填丝焊接,实现了 4 层填满 34 mm 厚 Fe430B 板。多层焊表现出很强的适应性,前一层热处理作用产生了回火马氏体组织,有利于细化焊缝晶粒,改善焊接接头的综合性能^[7]。吴世凯等^[8]利用 3.5 kW CO₂ 激光器,对 42CrMo 钢伞形齿轮轴进行了窄间隙激光填丝焊实验研究,在无预热和焊后热处理条件下获得无裂纹、气孔缺陷的优质焊缝,焊缝和热影响区的金相组织为细小的贝氏体组织。法国学者对焊丝反射问题进行了深入研究,证明采用小光斑直径焊接可获得高能量密度,降低焊丝对光束的反射,增大填充效率。

采用双光束焊接方法来控制焊接过程稳定性、减少气孔缺陷近年来也得到较多的研究与应用。姚伟等^[9]对铝合金薄板激光双光点焊接(包括不填丝和填丝)的焊缝成形、对接间隙和准直度容许裕度以及气孔状况进行了实验研究,结果表明,激光双光点焊接铝合金所得焊缝表面质量好、焊缝熔宽大,对接间隙和准直度容许裕度明显放宽,且焊缝中大气孔

的数量显著减少。2001 年, M. Onozuka 等^[10]利用激光功率分别为 3 kW 和 4 kW 的双 YAG 激光联合焊接了 40 mm 厚核反应堆真空管,光束间距 0.6 mm。实验结果证明,采用双光束焊接增加了焊接过程的稳定性和熔深,减小了气孔和热裂纹等缺陷。

本文将针对船用低合金高强度 11CrNi3MnMoV, 研究激光填丝多层焊工艺特性, 对比分析在单光束、双光束、层间保温及热丝焊等不同的工艺条件下焊缝成形规律, 并着重分析气孔与未熔合缺陷的抑制与控制方法。

2 实验材料与条件

2.1 实验材料

实验材料为 16 mm 厚低合金高强度 11CrNi3MnMoV, 其化学成分见表 1。填充焊丝采用 $\phi 1.2$ mm 的高强度专用焊丝, 牌号为 10M960S, 化学成分见表 2。

表 1 11CrNi3MnMoV 低合金高强度钢化学成分

Table 1 Composition of the 921 high strength steel

Elements	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	V
Mass fraction/%	0.11	0.44	0.03	0.023	0.18	0.97	2.68	—	0.23	0.077

表 2 高强度专用焊丝成分

Table 2 Composition of the special filler of high strength steel

Elements	C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	Ti
Mass fraction/%	0.028	0.493	1.48	0.0090	0.0094	2.36	0.239	0.118

2.2 实验条件

以 3 kW 扩散冷却 CO₂ 激光器、福尼斯 KD4010 型送丝机为主要设备。单光束采用聚焦形式, 双光束焦点间距为 0.6 mm 的(能量比为 1:1)。焊接时双光束采用并行排列方式, 即双焦点连接垂直于焊缝中心线。采用远红外辐射加热器进行层间保温, 将试件加热到 150~200 °C。工件正面氩气保护。

经过多种坡口形式的焊接实验发现, 对于厚板激光填丝焊接, 采用窄间隙的坡口形式是最为理想的。因为窄间隙坡口的侧壁可一定程度限制焊丝在坡口中的摆动, 提高焊丝稳定性, 而且, 焊接过程也有利于侧壁从激光与焊丝中吸收更多的热量, 提高侧壁与填充材料的熔合性。坡口形状与具体尺寸如图 1 所示。

3 实验结果与讨论

3.1 单光束填丝多层焊

图 2 所示为单光束填丝焊得到的焊缝截面形貌。主要工艺参数: 激光功率 2500 W, 焊接速度 0.3 m/min, 送丝速度 1.5 m/min。从图中可以看出, 焊缝侧壁熔合较好, 但下部出现较多气孔。焊接过程中, 前几层焊接的热量累积使上层焊缝的层间温度升高, 熔池匙孔易于稳定, 利于气泡溢出, 因此气孔出现概率很少。

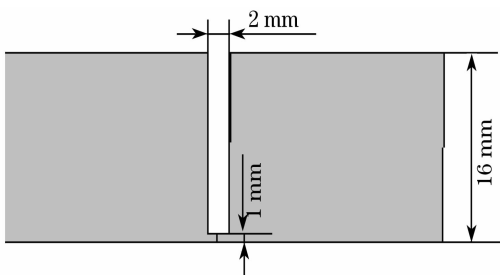


图 1 坡口形状与尺寸

Fig. 1 Schematic diagram of the joint

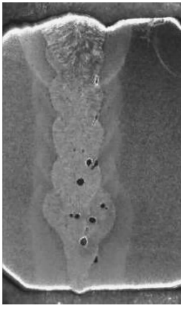


图 2 单光束填丝多层焊的典型焊缝截面形貌

Fig. 2 Cross section of the joint processed by single beam laser multilayer welding with filler wire

单光束焊接时稳定性较差,焊接飞溅较大,焊缝表面较粗糙,内部有较大气孔,操作过程对焊丝位置的对中性要求比较严格。

3.2 双光束填丝多层焊

为提高焊丝的对中性与焊接过程的稳定性,采用双光束并列排布进行了多层填丝焊实验,双光束焦点的间距设计为 0.6 mm。这样,可以在一个熔池中形成一个较大的匙孔,降低匙孔闭合概率,提高焊接过程稳定性。图 3 所示为双光束焊接的结果,主要焊接参数如下:激光总功率 2600 W,两束激光平均分配,焊接速度 0.3 m/min,送丝速度 1.5 m/min。

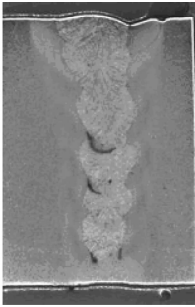


图 3 双光束填丝多层焊的典型焊缝截面形貌

Fig. 3 Cross section of the joint processed by dual beam laser multilayer welding with filler wire

从图 3 可以看出,采用双光束焊接,焊缝气孔明显减少。但是在层间出现了明显的未熔合缺陷。双光束焊接不仅改善了光斑对焊丝对中性的要求,而且,两束光共同作用下可以形成一个更大的熔池和匙孔,有利于内部气泡的溢出,匙孔也更加稳定。由于双光束是由一束光分光而来,两束光共同作用无疑降低了加热区的能量密度,带来的新问题是层间的可靠熔化难以保障,而且每层之间的“束腰”现象也明显增大,这将会对焊缝强度有较大的影响。因此说,采用双光束焊接,需要较大的激光能量密度,方可得到较为满意的焊接结果。

3.3 层间保温作用

采用远红外辐射加热器进行工件预热,将层间温度保持在 150 ℃左右,再进行双光束填丝多层焊接实验。焊接截面形貌如图 4 所示。主要工艺参数为:激光功率 2500 W,焊接速度 0.3 m/min,送丝速度 1.5 m/min。

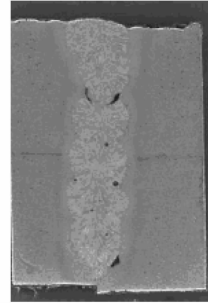


图 4 层间保温对改善焊接接头缺陷的作用

Fig. 4 Influence of the interbedded heat preservation on the suppress of the defects in the joint

可以看出,每层焊缝之间的“束腰”现象得到了明显的改善,焊缝底部与上部还存在少量未熔合现象,这主要还是与激光能量密度较低及送丝不稳定有关。层间保温减缓了激光焊接过程的冷却速度,同时也增大了激光焊接的熔化效率。可见,提高和维持层间温度是抑制未熔合的重要措施。

3.4 热丝焊

热丝焊的能量输入可调,焊丝被加热至接近熔点后直接送入熔池,几乎没有能量散失,且处于高温态的焊丝会使其对激光能量的吸收率大大增加。因此热丝焊的能量利用率、焊丝熔化效率和熔覆速率都将比单纯增加激光线能量更加有效,可以很好地解决中小功率条件下的激光填丝焊的能量分配问题,保证焊丝与母材均获得较大的热输入。

在上述焊接工艺条件下,将热丝电流选取在 80 A 左右,获得图 5 所示的焊接结果。

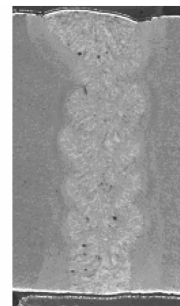


图 5 双光束热丝焊的焊缝截面宏观形貌

Fig. 5 Cross section of the joint processed by dual beam laser multilayer welding with hot filler wire

采用双光束热丝焊工艺焊接高强钢板,得到的焊缝宏观形貌均非常整齐美观,前期一直难以克服的焊缝侧壁和层间未熔合缺陷基本上得以消除,只在焊缝某些区域存在少量焊接气孔。实验表明,热丝焊技术与层间保温相比能更有效地改善高强钢激光焊接的气孔与未熔合缺陷,层间过渡平缓,束腰现象也得到改善,同时也具有较宽的工艺适应性,为高强钢厚板连接优选工艺。

3.5 接头性能

利用型号为 CSS-44300,最大拉力为 300 kN 的电子万能实验机,选取部分完全熔透且成形良好的试件进行了力学拉伸实验。拉伸试样采用非标准试样,实验结果如图 6 所示。

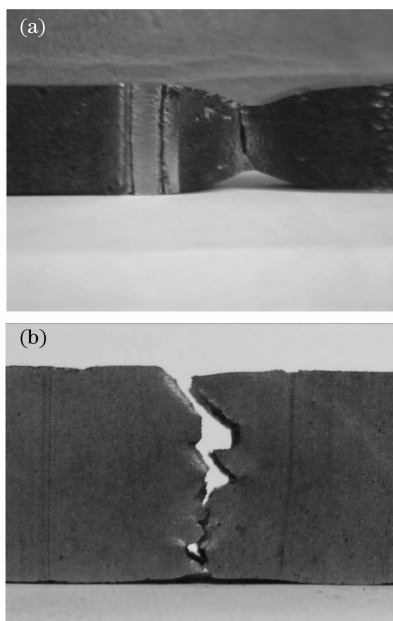


图 6 拉伸实验焊缝断裂位置和形貌
(a) 断裂于母材处;(b) 焊缝断裂轨迹

Fig. 6 Morphology and location of the crack during tensile tests. (a) Crack along the substrate; (b) crack along the joint

当焊缝中无未熔合或缺陷较小时,拉伸试样大多断在母材,断裂形貌如图 6(a)所示。图 6(b)显示的为焊缝的断裂轨迹,可见,每层焊缝金属一般呈韧性剪切断裂,拉伸强度较高,未熔合缺陷是影响接头力学性能的主要因素。

拉伸实验结果统计表明,拉伸实验焊接接头主要断裂在焊缝处,层间断裂界限一般比较清晰,每一层的束腰位置为低强度脆断区,断裂形式见图 7 (a)。图 7 (b)为部分典型的高强钢焊接试样的抗拉强度。其中,试样 1~3 为双光束热丝焊接头,焊件 1 为几乎无未熔合与气孔缺陷的焊缝抗拉强度,焊

接头断裂于母材。焊件 2 及 3 中存在少量未熔合与气孔(参考欧洲 ISO13919-2:2001 铝合金激光焊质量等级标准,气孔率 1.5%,未熔合小于 0.6 mm。),可以看出,焊缝中少量存在的缺陷对强度影响不很大,焊缝强度均达到母材 97%以上。焊件 4 及 5 为普通双光束填丝焊接头,其中焊件 5 中存在较大的未熔合缺陷(最大未熔合 1.4 mm)。可以看出,热丝焊试样的平均抗拉强度比普通填丝焊高 4%~7%。焊丝的预热作用在焊接过程中起到至关重要的作用,使得双光束焊接激光能量分配保证焊丝和母材可靠熔化,获得稳定焊接过程。

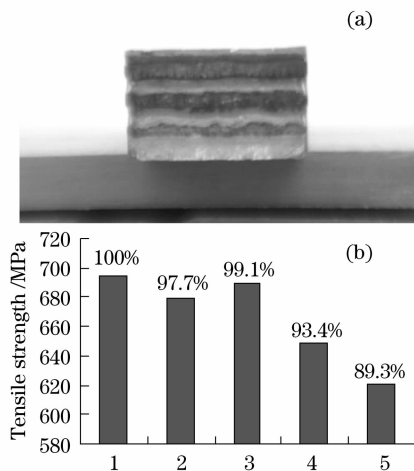


图 7 焊缝断裂形貌与抗拉强度柱形图。(a) 双光束并行焊的焊缝截面;(b) 部分试样抗拉强度柱形图

Fig. 7 Morphology of the fracture surface and tensile strength of the joint. (a) Fracture surface of the joint with parallel dual beam; (b) histogram of tensile strength of partial specimens

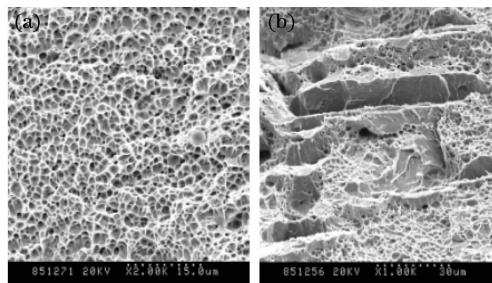


图 8 焊缝断口扫描电镜形貌。(a) 焊缝韧窝断口形貌;(b) 焊缝韧窝+解理断口形貌

Fig. 8 SEM micrograph of the fracture surface of the joint (a) Dimple fracture; (b) dimple and cleavage fracture

对焊缝金属进行扫描电镜(SEM)分析发现,每层焊缝金属的断裂形式几乎都是细小的韧窝型断裂,韧窝外侧的撕裂棱明显。不同层焊缝断口的形貌差别主要是韧窝的尺寸和深浅有所不同,焊缝内

部韧窝形貌如图 8(a) 所示。这是由于高强钢母材和填充焊丝金属本身的强度和塑性都非常好的缘故。但并不是所有的焊缝内部都呈韧窝形貌, 部分焊缝内部存在局部的解理断口形貌特征, 如图 8(b) 所示。产生局部解理断裂的原因可能是因为在焊缝内部存在局部的未熔合缺陷和夹杂物, 在拉力的作用下发生脆断而产生。

4 结 论

1) 设计窄间隙坡口形式, 采用 3 kW CO₂ 激光填丝焊实现了 16 mm 厚高强钢的激光填丝单道多层焊。通过坡口内壁来限制焊丝的横向摆动, 保证了多层焊的送丝稳定性, 改善侧壁熔合情况。

2) 单光束多层焊焊接飞溅大, 成形不良, 焊接过程不稳定, 气孔多, 对焊丝位置的对中性要求严格; 双光束激光填丝多层焊可增加熔池加热范围, 提高匙孔稳定性, 使激光能量分配更加合理, 焊接过程更加稳定, 焊缝成形好, 气孔明显减少。由于降低了能量密度, 难以彻底解决未熔合现象。

3) 采用双光束配合层间保温或热丝焊技术, 不仅大大减轻气孔和未熔合缺陷, 而且减小层间束腰宽度, 改善焊缝金属与母材侧壁的熔合情况, 从而提高接头的综合性能, 其中热丝辅助双光束焊接技术表现出更强的焊接优势。

4) 双光束热丝焊接接头强度可达母材 97% 以上, 少量的未熔合与气孔缺陷(气孔率 1.5%, 未熔合小于 0.6 mm) 对焊缝强度影响并不大。试样大多在焊缝处断裂, 焊缝断口呈现为韧窝型剪切断裂。层间束腰处是力学性能薄弱区。热丝焊试样平均抗拉强度比普通填丝焊高 4%~7%。

参 考 文 献

1 S. Dadras, M. J. Torkamany, J. Sabbaghzadeh. Spectroscopic

- characterization of low-nickel copper welding with pulsed Nd : YAG laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, **46** (10): 769~776
- 2 Qi Junfeng, Niu Zhen, Zhang Dongyun *et al.*. Control of shaping of welds for CO₂ laser welding shipbuilding T-section aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 297~302
- 祁俊峰, 牛 振, 张冬云等. CO₂ 激光焊接船用铝合金 T 型材的焊缝成形控制[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 297~302
- 3 Yang Xichen, Wang Yu, Ying Chaolong *et al.*. Microstructure and properties of high power laser welding of ship steel plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 866~870
- 杨洗陈, 王 雨, 应朝龙等. 高功率激光焊接船板的组织性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 866~870
- 4 Wang Wei, Chen Li, Zhao Xingke *et al.*. Effect of welding parameters on formation of welds during laser welding of NiTi shape memory alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 291~296
- 王 蔚, 陈 俐, 赵兴科等. 激光焊接工艺参数对 NiTi 形状记忆合金焊缝成形的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 291~296
- 5 Chen Li, Hu Xiyuan, Hu Lunji. Characteristics on laser beam welded high strength steel[J]. *New Technology & New Process*, 2002, **34**(11): 26~28
- 陈 俐, 胡席远, 胡伦骥. 高强度钢的激光焊接性研究[J]. *新技术新工艺*, 2002, **34**(11): 26~28
- 6 Mei Hanhua, Xiao Rongshi, Zuo Tiechuan. The study on laser welding with filler wire[J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 1996, **3**(22): 38~41
- 梅汉华, 肖荣诗, 左铁钊. 采用填充焊丝激光焊接工艺的研究[J]. *北京工业大学学报*, 1996, **3**(22): 38~41
- 7 G. Caironi, M. Coffetti. Problems linked to laser welding of components having large thicknesses[C]. *15th World Conference on Non-Destructive Testing*, 2002, **45**(2): 16~24
- 8 Wu Shikai, Yang Wuxiong, Dong Peng *et al.*. Microstructure and properties of welded joint for narrow gap laser welding of 42CrMo steel bevel gear shaft[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(4): 25~28
- 吴世凯, 杨武雄, 董 鹏等. 42CrMo 钢伞形齿轮轴窄间隙激光焊接接头组织与性能[J]. *焊接学报*, 2007, **28**(4): 25~28
- 9 Yao Wei, Gong Shuili, S. Steve. Twin spot laser welding characteristics of aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(4): 3~8
- 姚 伟, 巩水利, S. Steve. 铝合金激光双光点焊接工艺特性[J]. *焊接学报*, 2007, **28**(4): 3~8
- 10 M. Onozuka, J. P. Alfille, Ph. Aubert *et al.*. Manufacturing and maintenance technologies developed for a thick-wall structure of the ITER vacuum vessel[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2001, **55** (4): 397~410