

文章编号: 0258-7025(2010)05-1361-07

高强钢双光束填丝多层焊的焊缝组织特征

尹 杰 李俐群 陶 汪 张新戈

(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 采用双光束激光辅助热丝工艺实现了 16 mm 厚 11CrNi3MnMoV 低合金高强钢的可靠连接, 接头强度高于母材。在此基础上, 重点研究了激光焊缝原始组织、激光二次重熔、经历热处理后的焊缝不同区域的组织变化规律。结果表明, 双光束激光填丝焊的焊缝组织主要为贝氏体和针状铁素体, 经历重熔与热处理后的焊缝组织发生明显细化, 且经过热处理后的组织具有类似母材热影响区的分布规律, 变化明显, 主要为贝氏体正火组织和回火组织, 且内层焊缝中的针状铁素体含量明显多于末层焊缝。同时在焊缝中存在大量的相互平行且紧密排列的铁素体束, 有利于提高焊缝强韧性。

关键词 激光技术; 高强钢; 双光束; 激光填丝; 多层焊; 微观组织

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1361

Weld Microstructure Characteristics of Dual Laser Beam Multi-Layer Welded High Strength Steel with Filler Wire

Yin Jie Li Liqun Tao Wang Zhang Xin'ge

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

Abstract In present work, the 16 mm thick 11CrNi3MnMoV low alloy high strength steel plates are well joined by dual laser beams welding with hot filler wire, and the strength of joint is higher than parent metal. The microstructure characteristics of primary laser weld, the secondary remelting weld, heat treatment weld, and the effect of microstructure transformation on performances of weld are investigated. The results indicate that, in dual laser beams welding with filler wire, the microstructure of weld is mainly bainite and acicular ferrite, which should be refined by remelting and heat treatment. It's distinct that the microstructure in reheated zone is similar to that of heat affected zone, and consists of normalized and tempered bainite. Moreover, the acicular ferrite in inner layer weld is much more than that in last layer weld. Meanwhile, a large number of parallel and compact ferrite exist in weld, which improve the tough of weld joint.

Key words laser technique; high strength steel; dual laser beams; laser welding with filler wire; multi-layer welding; microstructure

1 引 言

低合金高强钢具有屈服强度和断裂韧性高、韧脆转变温度低等优点, 加之良好的热加工性和冷成型性, 使其作为一类重要的钢铁材料, 在桥梁、建筑、船舶、高压容器、管材及管线、工程机械及车辆等方面都有广泛应用^[1]。激光填丝多层焊技术焊接中厚板,

可以通过填充金属来改变焊缝区的成分和组织, 提高接头性能, 而且焊缝热影响区(HAZ)和焊接变形也较小。它可以利用中小功率的激光器来实现中厚板窄焊道的多层焊接, 具有很大的应用价值。以传统单束激光进行填丝焊接时, 焊丝与激光焦点的中性要求很高, 焊接过程稳定性难以保证, 尤其是在焊接底层焊缝时。若以双光束为热源, 则可以增大激光辐照的有

收稿日期: 2009-06-09; 收到修改稿日期: 2009-08-11

基金项目: 现代焊接生产技术国家重点实验室自主课题资助项目。

作者简介: 尹 杰(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事高强钢激光焊接工艺及机理方面的研究。

E-mail: 03051401yj@163.com

导师简介: 李俐群(1970—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: laser116@yahoo.com

(通信联系人)

效面积,提高光束对焊丝波动的适应性,同时也可以改善焊缝侧壁的熔合性。通过设计双光束热源的排布方式还可以改善热循环,有效控制激光焊过程中因冷却速度过快造成的裂纹、气孔等缺陷。

目前对厚钢板除了采用大功率激光焊接外,对激光填丝多层焊工艺也已经开展了一定的研究,主要都集中在对激光填丝焊工艺参数对焊缝成形的影响、光束与焊丝相互作用的机理及能量分配以及对激光填丝焊焊缝组织的研究,也有部分研究成果已经成功应用于工业生产。王涛等^[2]采用8.7 kW激光成功地穿透焊接了8 mm厚钢板。杨洗陈等^[3]采用高功率激光进行船板材料的焊接实验,最终在12 mm厚船板上获得了无裂纹的良好焊缝,实现单面焊双面一次成形。王成等^[4]利用自行设计的填丝激光焊系统,研究了大功率CO₂激光填丝焊接工艺参数对HAZ尺寸及焊缝成形的影响。江兴荣等^[5]对激光束被焊丝反射的情况进行了研究,分析认为,在焊丝的端部,固态焊丝和熔滴均可反射激光束,反射的角度遵循光学定律,因此,也取决于焊丝输入角度和反射面的几何形状。吴世凯等^[6]对调质状态下42CrMo钢窄间隙激光填充焊丝焊接接头的金相组织、显微硬度和接头力学性能进行了研究。结果表明,在无预热和焊后热处理情况下,采用合适的激光焊接工艺参数可以避免裂纹、气孔等缺陷的产生,焊缝和热影响区的金相组织主要为细小的贝氏体组织。Riva工学院研究人员采用15 kW大功率激光器进行激光多层填丝焊试验,实现了4层填满34 mm厚Fe430B板,分析认为多层焊显示了令人满意的调整性,前一层热处理作用产生了回火马氏体组织^[7]。Coste等^[8]利用7 kW YAG激光器对40 mm

厚316L板进行多层填丝焊接,认为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。Jokinen等^[9]利用3 kW激光器对30 mm厚奥氏体不锈钢板进行了窄间隙填丝多层焊研究,试验结果表明,小坡口角度有利于焊缝成形稳定性。2001年,德国汉诺威大学Onozuka等^[10]采用激光功率分别为3 kW和4 kW的双光束填丝多层焊工艺方法焊接了40 mm厚核反应堆真空管,材料为SS316L不锈钢板。英国焊接研究所对铝合金薄板采用双光束填丝焊方法进行了试验研究,结果表明,与激光单光点焊接相比,激光双光点焊接铝合金所得焊缝表面质量更好,焊缝熔宽更大,可以显著减少焊缝中大气孔的数量^[11]。但是在船用低合金高强钢激光填丝多层焊后接头组织的研究方面并未见有关报道。

本研究采用双光束激光填丝热丝工艺实现了中厚11CrNi3MnMoV低合金高强钢的可靠连接。将重点对多层焊过程高能量密度激光重复加热作用下低合金高强钢的焊缝微观组织结构与演变规律进行深入分析。

2 试验材料与条件

2.1 试验材料

试验材料为16 mm厚11CrNi3MnMoV高强钢,试件规格为140 mm×55 mm×16 mm,其化学成分如表1所示,其理论抗拉强度值为700 MPa。填充焊丝采用 ϕ 1.2 mm的高强钢专用焊丝,牌号为10M960S,化学成分如表2所示。焊前用丙酮对试件进行化学清洗以除去试板表面的油污。

表1 11CrNi3MnMoV高强钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 11CrNi3MnMoV high strength steel (mass fraction, %)

Element	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	V
Content	0.11	0.44	0.03	0.023	0.18	0.97	2.68	—	0.23	0.077

表2 高强钢专用焊丝成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of filler wire (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	Ti
Content	0.028	0.493	1.48	0.0090	0.0094	2.36	0.239	0.118

2.2 试验条件

试验设备为3 kW扩散冷却CO₂激光器、福尼斯KD4010型送丝机与福尼斯TP1500HD热丝电源,热丝电流范围10~150 A,电压恒定为10 V。工件正面氩气保护。根据焊丝直径(1.2 mm)设计超窄间隙焊缝坡口,坡口形式与尺寸如图1所示,利用

坡口限制、引导焊丝的送入位置。焊接前用丙酮仔细清洗坡口侧面,去除杂质。

双光束采用并行模式,焦点间距为0.6 mm(能量比为1:1),如图1所示,采用后送丝方式。由于生成的等离子体处在窄间隙坡口内,其能量可以用于加热侧壁和焊丝,提高焊丝和侧壁熔化性。不同于

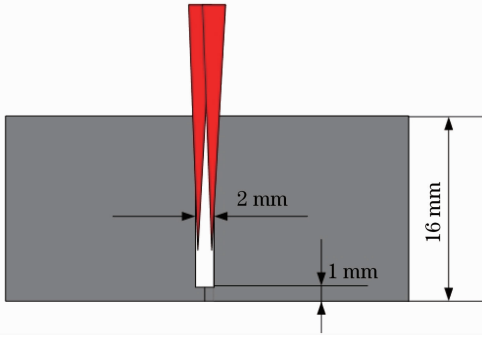


图 1 双光束填丝多层焊原理示意图

Fig. 1 Schematic drawing of dual laser beam welding with filler wire

单激光深熔焊,无需采用等离子体吹除气。优化后的焊接工艺参数范围为:双光束激光总功率 2500~2700 W,焊接速度 0.3~0.4 m/min,送丝角度为 30°。焊接过程中双焦点始终保持聚焦于每层焊缝的表面,焊接过程采用热丝工艺提高激光能量吸收率,试件预热温度为 120 ℃~150 ℃。

3 试验结果与分析

3.1 接头特征

焊缝的表面成形平整光滑。图 2 为激光双光束填丝多层焊工艺优化后的焊缝横截面形貌,基本上消除了多层焊接未熔合缺陷和气孔缺陷,层与层之间有典型的匙孔焊缝形貌。

不同于传统弧焊方法,激光多层焊接头具有如下明显的特点:

1) 两层焊缝之间有较深的搭接量,呈“丁”字形形貌。多层焊时,上一层的焊缝都会在下一层的焊缝中产生较大的熔深,以保证两层间的光滑过渡和



图 2 接头宏观形貌

Fig. 2 Weld bead profile of joint

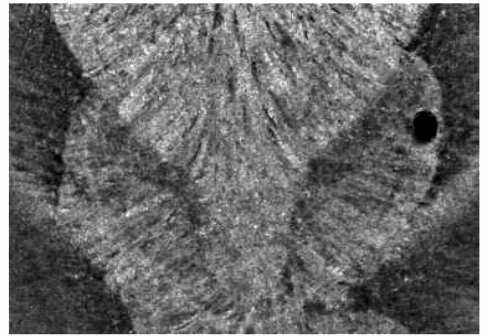


图 3 激光填丝多层焊接头特征

Fig. 3 Macrostructure characteristics of laser multi-layer welding with filler wire

充分层间熔合,如图 3 所示。

2) 激光焊接细晶区比较宽,粗晶区很窄,且均由细小的板条马氏体组织组成,如图 4 所示。这种特征大大削弱了粗晶区对接头性能存在的不利影响,极大改善了热影响区的综合性能,减少了裂纹的产生。



图 4 接头组织特征。(a) 接头组织分布;(b) 粗晶区;(c) 细晶区

Fig. 4 Microstructure characteristics of joint

(a) microstructure zone distribution; (b) coarse grain in HAZ; (c) fine grain in HAZ

拉伸试验结果分析表明,拉伸试件均断在母材处,表明焊缝抗拉强度值高于母材。拉伸过程中,母材有明显的“颈缩”现象,延伸率较大,裂纹是沿着剪切面扩展到试件表面的,剪切面方向与拉伸方向轴

线近似呈 45°,为典型的韧性断裂,如图 5 所示。

3.2 不同区域的微观组织特征

图 6 为母材的金相组织形貌,由于母材焊前为调质状态,组织主要为回火马氏体。

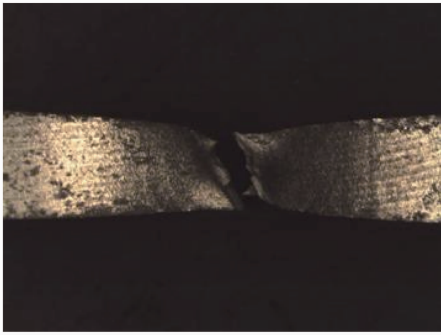


图 5 试件断裂宏观形貌

Fig. 5 Macroscopical fracture appearance

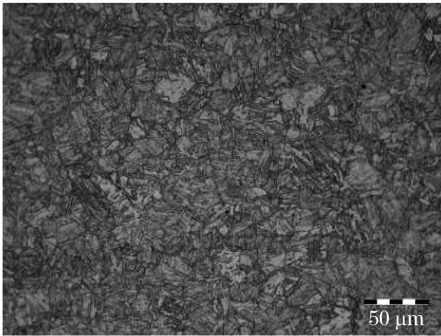


图 6 母材微观组织

Fig. 6 Microstructure of parent metal

对于低合金钢来说,它的主要组成相为铁素体相,在不同的热循环条件下,铁素体相与渗碳体相以不同的方式结合,形成了不同的组织结构。上一层焊缝对下一层的重熔作用将会使焊缝组织状态更为复杂。

焊缝区三个典型部位的微观组织状态包括激光焊的原始焊缝组织(I区),经历二次重熔后焊缝组织(II区)和经历热处理的内层焊缝组织(III区),如图7所示。

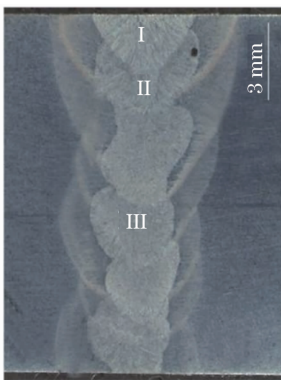


图 7 微观组织分析位置

Fig. 7 Analysis location for microstructure

激光焊的原始焊缝组织(I区):该组织即为末层焊缝组织,它是在激光与光致等离子体的共同作

用下形成的,只经历一次焊接高温作用。如图8所示,此区域主要由粗大的柱状晶组成,可以清楚地看到柱晶间界。金相组织观察发现其主要为贝氏体类型混合组织、针状铁素体组织 AF 及先共析晶界铁素体组织 PF 和少量的低碳马氏体组织。其中粒状贝氏体的特征是在块状铁素体(白色)上弥散分布着岛状和短杆状的 M-A 组元或者一些富碳奥氏体的分解物,这些弥散的物质无论是 M-A 组元还是富碳奥氏体的分解产物都可以起到复相强化作用,具有较好的强韧性^[12],上贝氏体形貌呈羽毛状。针状铁素体 AF 可以使得该焊缝金属的强度、韧性、抗解离能力以及抗应力腐蚀和抗氢脆能力得到提高,使焊缝具有较好的综合性能。合金元素的含量对针状铁素体形成的影响是很大的。低合金钢焊缝金属中的 Mn 的质量分数在 0.6%~1.8% 之间时,随着 Mn 含量的增加 AF 的含量增加;Ni 质量分数在 0.5%~3.5% 范围内时,随着 Ni 含量的提高,PF 数量下降,而 AF 数量增加且被细化。

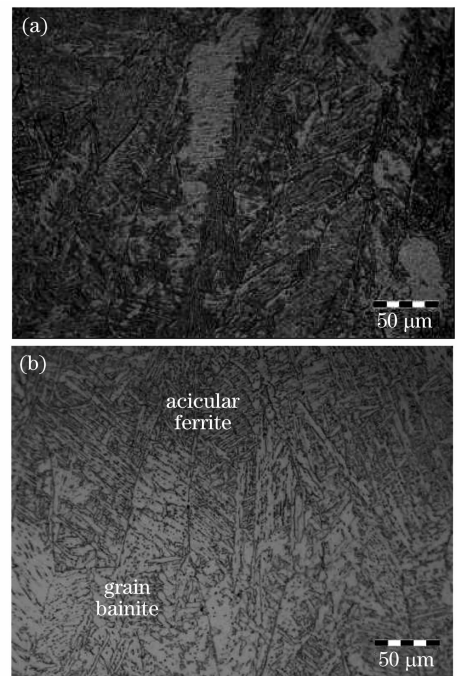


图 8 激光焊的原始焊缝组织(I区)

(a) 柱状晶; (b) 焊缝组织

Fig. 8 Primary microstructure (I region)

(a) columnar grain; (b) microstructure in weld

经历二次重熔后焊缝组织(II区):这个区域是一个层与层之间的过渡区,经历高温激光二次加热的作用。激光焊接过程由于存在匙孔与等离子体,其熔池温度在 2000 °C~2500 °C,等离子体温度可达 8000 K 以上^[13]。此区域的金属经过两次这样的

高温加热与快速冷却后,组织状态变得非常复杂。从图 9 可以看出,此区域组织成分主要还是粒状贝氏体和针状铁素体以及少量低碳马氏体组织,但是与激光焊的原始焊缝相比,组织更加细小,形成一个细晶区,起到了细晶强化的作用,正如一个强韧性很好的纽带连接着上下两层焊道,对层与层的牢固结合起到了至关重要的作用。

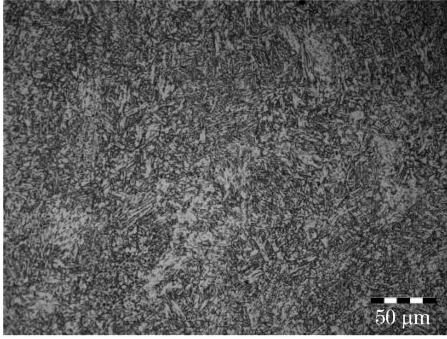


图 9 二次重熔后的焊缝组织(Ⅱ区)

Fig. 9 Microstructure of secondary remelting (II region)

经历热处理后内层焊缝组织(Ⅲ区):此区组织位于一层焊缝的中下部,未经重熔,但经历了后层焊缝的再次热处理作用,原来的柱状晶大部分都消失,碳化物重新扩散和析出,得到了一种类似于母材热影响区的组织分布规律,随着温度由上至下的变化组织形貌也有了比较明显的变化,这主要是由于受热处理温度不同引起的,如图 10 所示。最靠近层间的 A 区组织相对于未经热处理时的激光焊原始焊缝组织很细很均匀,为贝氏体正火类型组织。图中偏下的 B 区虽然柱状晶已不存在,但铁素体块和晶粒尺寸较 A 区大,能够看到原奥氏体晶界,但与激光焊原始组织相比其组织也更均匀细化,介于 A 区和 C 区之间,为一种贝氏体热处理后的混合组织。最下面的 C 区组织受到再热作用温度较低,与回火温度范围相当,碳化物发生扩散,相对于原始焊缝组织得到部分细化,消除了残余应力,生成了一种贝氏体回火类型组织和少量的回火马氏体组织,在晶界仍可以发现明显的先共析晶界铁素体。

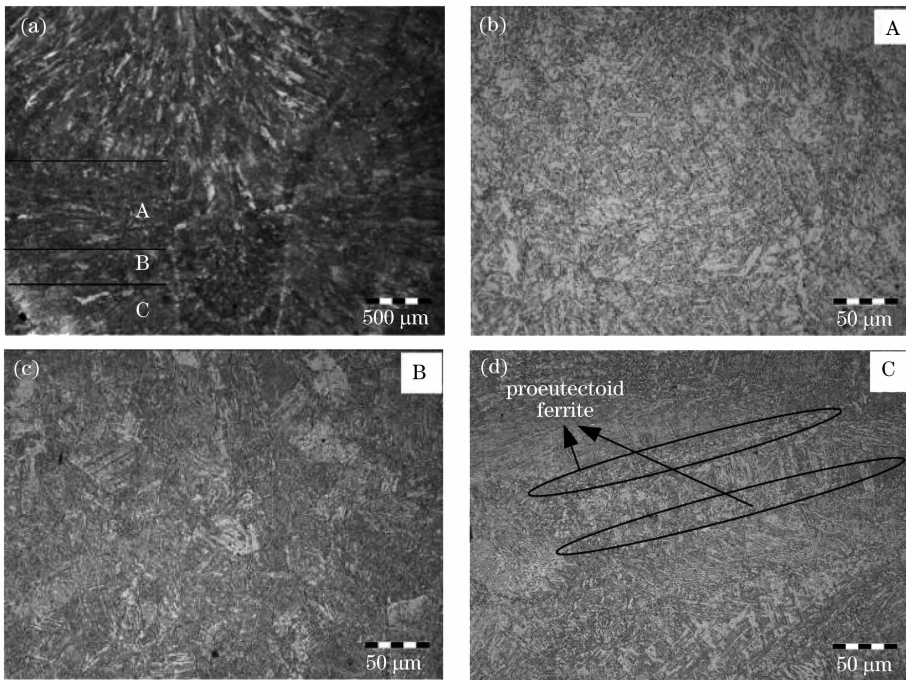


图 10 经历热处理后的内层焊缝组织(Ⅲ区)

Fig. 10 Microstructure of heat treatment (III region)

此外,还发现焊缝中的针状铁素体与母材相比含量增多,这主要是由于经历多次再热作用合金元素发生扩散,内层焊缝中的合金元素含量增多造成的。图 11 的能谱分析发现,由 A 至 G 主要合金元素含量逐渐升高。其中 Cr 元素,G 区相比 A 区质量分数高出了 81.3% 左右;对于 Mn 元素,G 区相比

A 区质量分数大约高出 31%;Ni 元素底层质量分数比顶层高出 21% 左右。

3.3 元素分布规律及铁素体束

对焊缝组织进行能谱分析发现,前面 3 个典型区域中合金元素都是按照一定的规律分布的,图 12 所示为能谱分析区域,铁素体基体间隙处的 Ni 元素

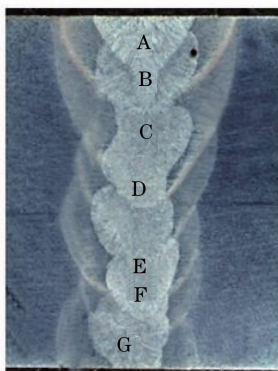


图 11 能谱分析位置

Fig. 11 Analysis location for energy dispersive spectroscopy (EDS)

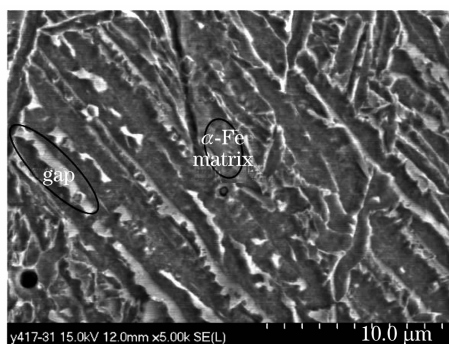


图 12 合金元素能谱分析位置

Fig. 12 Analysis location for alloying elements EDS

质量分数比基体处高出 13%~25.8%, Mn 元素质量分数相比铁素体基体高出 23%~37.5%; 这表明合金元素更多地分布在 α -铁素体间隙处。

同时,在扫描电镜(SEM)下观察组织时发现,焊缝中许多区域存在大量的铁素体束,如图 13 所示。这些细长且均匀的铁素体条就像细密的藤条交织在一起,相互平行,紧密排列,能够有效地阻止拉裂,防止裂纹的产生,提高抗拉性能,这些大量的铁素体束在提高强度的同时强化了韧性。

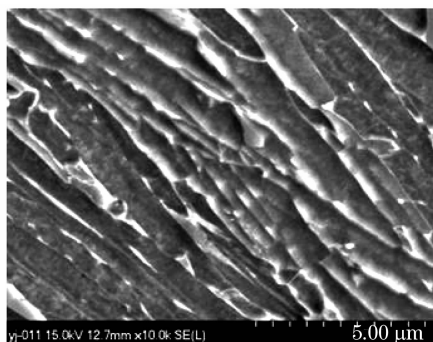


图 13 SEM 下的铁素体束

Fig. 13 Ferrite bundle in SEM

4 结 论

1) 激光填丝多层焊的两层焊道之间有较深的搭接量,呈“丁”字形形貌;组织沿垂直于熔合线对称生长;母材的 HAZ 中粗晶区很窄,细晶区很宽。

2) 原始激光焊的焊缝组织主要为贝氏体类型组织和针状铁素体及先共析铁素体组织和少量的低碳马氏体组织。经历二次重熔后焊缝组织更加细化,形成一个细晶区,起到了细晶强化作用,组织主要为粒状贝氏体和针状铁素体组织。未能重熔但经历激光二次加热的热处理后的焊缝组织与原始激光焊的焊缝组织晶粒也发生较大的细化,其组织主要是贝氏体正火类型组织和贝氏体回火类型组织。但其晶粒尺寸由上至下有较明显变化,远离重熔区的组织晶粒会略为变粗。

3) 经历热处理后焊缝组织中针状铁素体数量相比原始激光焊的焊缝组织增多,改善了焊缝综合性能,合金元素 Ni, Mn 主要分布在铁素体间隙处。同时在焊缝组织中存在许多细长且均匀的铁素体条,紧密地交织在一起,提高了焊缝抗拉强度,有效地阻止了拉裂。

参 考 文 献

- Xu Pingguang, Bai Bingzhe, Fang Hongsheng. Current status and development of high strength low alloy steel plate [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2001, **25**(2):2~6
徐平光,白秉哲,方鸿生. 高强度低合金中厚钢板的现状与发展[J]. *机械工程材料*, 2001, **25**(2):2~6
- Wang Tao, Zheng Qiguang, Tao Xingzhi *et al.*. Study of laser welding of thick steel plates [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(2):179~184
王涛,郑启光,陶星之等. 厚钢板激光焊接的研究[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(2):179~184
- 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
- Wang Cheng, Zhang Xudong, Chen Wuzhu *et al.*. Study on weld formation during CO₂ laser welding with filler wire [J]. *Applied Laser*, 1999, **19**(5):269~271,312
王成,张旭东,陈武柱等. 填丝 CO₂ 激光焊的焊缝成型研究[J]. *应用激光*, 1999, **19**(5):269~271,312
- Jiang Xingrong, Zhang Lei. Interactions of laser beam with filler metal [J]. *Welded Pipe and Tube*, 1997, **20**(3):2~7
江兴荣,张雷. 激光束与填充金属之间的相互作用[J]. *焊管*, 1997, **20**(3):2~7
- Wu Shikai, Yang Wuxiong, Xiao Rongshi *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):3~9
吴世凯,杨武雄,肖荣诗等. 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):3~9
- 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 Frédéric Coste, Lilian Sabatier. Nd:YAG laser welding of 60 mm thickness 316L parts using multiple passes [C]. *20th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, Jacksonville, Florida USA, 2001, 1598~1712
- 9 Tommi Jokinen, Veli Kujanpää. Multi-pass Nd:YAG laser welding of thick section austenitic stainless steel [C]. *20th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, Jacksonville, Florida USA, 2001, 1720~1863
- 10 M. Onozuka, J. P. Alfile. 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
- 11 Yao Wei, Gong Shuili, Steven Shi. 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, Steve Shi. 铝合金激光双光点焊接工艺特性 [J]. *焊接学报*, 2007, **28**(4):3~8
- 12 Zhang Wenyue. *Welding Metallurgy* [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. 185
张文钺. *焊接冶金学*[M]. 北京:机械工业出版社, 1999. 185
- 13 Zhang Baosheng. Development and application of high temperature measurement technique in welding [J]. *J. Beijing Institute of Petro-Chemical Technology*, 2006, **14**(2):49~53
张宝生. 高温测量技术及其在焊接中的应用发展 [J]. *北京石油环工学报*, 2006, **14**(2):49~53