

# 热丝填充激光焊接光斑直径与对接间隙裕度研究

张书权<sup>1,2</sup> 吴杰峰<sup>1</sup> 方超<sup>1,2</sup> 吴维越<sup>1</sup> 卫靖<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230000)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 装配间隙是影响国际热核聚变实验反应堆(ITER)校正场线圈盒激光封焊质量的重要因素之一。采用热丝填充激光焊接,在离焦量分别为+5、+10、+16 mm的情况下对5 mm厚核聚变用钢316LN在不同对接间隙条件下进行光斑直径与对接间隙裕度的研究。焊后进行了焊缝表面、截面形貌的分析,同时进行了金相组织、接头拉伸强度、显微硬度测试及断面电镜与成分分析。结果表明,在热丝填充激光焊接中,光斑直径大小不仅可以与对接间隙量相当,还可以在小于对接间隙量0.1~0.2 mm的情况下,得到表面成形较好且抗拉强度值较高的焊缝,当光斑直径小于对接间隙量达到0.3 mm时,焊缝表面成形变差且抗拉强度值下降。

**关键词** 激光技术;热丝填充激光焊;光斑直径;对接间隙裕度;316LN

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1003006

## Research on Focused Spot Diameter and Butt Joint Gap Margin in Laser Welding with Hot Wire Filler

Zhang Shuquan<sup>1,2</sup> Wu Jiefeng<sup>1</sup> Fang Chao<sup>1,2</sup> Wu Weiyue<sup>1</sup> Wei Jing<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230000, China)

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The assembly clearance is one of the factors that affect the laser closure welding quality for international thermonuclear experimental reactor (ITER) correction coil case. An experimental study on relationship between the focused spot diameter and the butt joint gap margin in the defocusing amount of +5, +10, +16 mm respectively is performed in laser butt welding of 5 mm thick 316LN steel for nuclear fusion with hot wire filler under various butt gaps. The weld topography and cross section, metallographic phase, tensile strength, micro hardness test, electron microscope and composition of cross-section are analyzed after welding. The results show that in laser welding with hot wire filler the focused spot diameter can not be only equivalent to the butt joint gap, but also can be 0.1~0.2 mm less than the butt joint gap when the weld is of good shape and the higher tensile strength is obtained. When it is 0.3 mm less than the butt joint gap, bad weld beads are obtained and the tensile strength of the weld decreases.

**Key words** laser technique; laser welding with hot wire filler; focused spot diameter; butt joint gap margin; 316LN

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

国际热核聚变实验反应堆(ITER)是一项仅次于国际空间站的国际大科学工程<sup>[1]</sup>,以解决人类的干净、清洁能源问题为研究目的。ITER校正场超导磁体系统由18个线圈组成,每个线圈由多匝超导体

组成,为保证ITER高质量运行的需要,内置线圈的线圈盒封焊要求变形小,焊缝内表面温度低。核聚变用钢316LN因其耐腐蚀性好、低温强度高优点而广泛用于核聚变实验装置中。激光焊由于能量密度高、热输入低、变形小等优点而广泛应用于工业生产

**收稿日期**: 2014-04-17; **收到修改稿日期**: 2014-05-07

**基金项目**: 科技部 ITER 专项(2008GB101000)

**作者简介**: 张书权(1975—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事激光焊接工艺及数值模拟等方面的研究。

E-mail: zhangshuquan@ipp.ac.cn

**导师简介**: 吴杰峰(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事核聚变实验装置研制及其相关技术等方面的研究。

E-mail: jfw@ipp.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

中<sup>[2-3]</sup>。Jokinen等<sup>[4]</sup>分别采用窄间隙激光多层焊接和激光-电弧复合焊接技术实现了20 mm厚 AISI304L 不锈钢板的焊接。吴世凯等<sup>[3]</sup>采用3500 W Slab及20 kW快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器研究了厚板万瓦级自熔焊接、窄间隙填丝焊接及激光-电弧复合焊接,实现了厚度超过10 mm的不锈钢对接焊接。采用激光自熔焊接时,对坡口加工与装配精度要求较高而限制了其应用,故采用填丝激光焊具有一定优势,但激光能量要同时熔化焊丝和母材,既对功率有较高要求,又会限制焊接速度。采用电阻热预加热焊丝的填丝激光焊,能减小焊丝对激光热源的依赖,改善未熔合缺陷,提高焊接速度及焊接过程的稳定性<sup>[5-8]</sup>。

由于 ITER 校正场线圈盒要求减少焊接变形并控制焊缝内表面温度,故采用热丝填充激光焊接,但由于其形状复杂、尺寸较大,5 mm厚的钝边间隙很难保证为小间隙,且间隙量也不均匀,如果对不同的间隙量采用同一焊接参数的话,则大间隙势必采用大光斑,而要保证焊透必须要求较高的激光功率,这样会增大焊接变形,背面温度也会升高,如果能根据不同的间隙量找到对应的不同的光斑直径和相应功率的话,可以大大减小焊接变形,控制背面温度。张屹等<sup>[8-9]</sup>研究了对接间隙对激光焊接质量的影响,同时提出不同的光斑直径对应不同的对接间隙极限这个课题还有待进一步研究。本文拟采用热丝填充激光焊对不同光斑直径与相应对接间隙裕度进行研究,旨在得出不同光斑直径对应不同的对接间隙极限下的合适焊接工艺参数,为 ITER 校正场线圈盒的激光封焊和实际生产提供一定的参考。

表 1 316LN 和 ER316LMn 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 316LN and ER316LMn(mass fraction, %)

Element	H	N	O	C	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Mn
316LN	0.00044	0.16	0.002	0.015	0.43	0.024	0.001	17.17	12.38	2.60	—
ER316LMn	—	0.156	—	0.018	0.46	0.017	0.003	20.59	15.37	2.83	7.01

### 2.3 热丝填充激光焊接工艺参数

焊接方式为对接,焊前将对接口面打磨平整,确保间隙均匀,并用丙酮彻底清洗焊接部位。分别对离焦量为+5、+10、+16 mm进行3大组试验,每一大组试验包括5组间隙不同的试验。试验中将工件固定,机器人带动激光头进行焊接,焊丝干丝长为28 mm,即为电阻加热长度。由于不同的离焦量对应不同的光斑直径,从而影响到激光功率及焊接过程的稳定性,故离焦量对对接间隙量有重要影响。通过关系式

$$d_z = d_0 \sqrt{1 + (4Az/d_0^2)^2}, \quad (1)$$

## 2 试验装置与方法

### 2.1 试验装置

试验装置如图1所示。采用光纤激光热丝焊接系统,激光器型号为IPG YLS-4000,额定功率为4 kW,模式为多模,焦距为250 mm,聚焦处光斑直径为0.42 mm,机器人选用KUKA-60HA,激光头为北京工业大学制造,采用侧吹喷嘴保护气。热丝机采用Fronius的TS-5000型号。焊接过程中,激光头沿竖直方向倾斜9°,以保证激光束前倾焊接,采用前送丝方式,光丝重合,焊丝接触工件,热丝时采用直流反接。

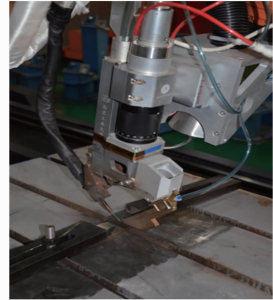


图 1 热丝填充激光焊接装置图

Fig. 1 Setup of the hot wire filling laser welding system

### 2.2 试验材料

试验材料为核聚变用钢316LN,抗拉强度 $\sigma_b > 480$  MPa,屈服强度 $\sigma_s > 250$  MPa,试件尺寸为100 mm×50 mm×5 mm。填充焊丝为伯合乐ER316LMn,焊丝直径 $\varphi = 1.2$  mm。母材和焊丝的化学成分如表1所示。

计算出离焦时的光斑直径。式中 $d_z$ 与 $d_0$ 分别表示离焦量为 $z$ 和0时的光斑直径, $A$ 为光束参数乘积,计算出离焦量为+5、+10、+16 mm时的光斑直径分别为0.51、0.71、1.01 mm。

为了防止焊缝表面出现凹陷、未熔合等缺陷,采用热丝填充焊接时,送丝速度应使填充焊丝熔化的体积能保证填满坡口间隙并形成一定的余高,送丝速度可根据坡口间隙、焊接速度来确定,公式为

$$k V_w \delta b = V_f \pi \varphi^2 / 4, \quad (2)$$

式中 $V_w$ 为焊接速度, $\delta$ 为板厚, $b$ 为间隙量, $V_f$ 为送丝速度, $k$ 为成形系数,取1.1~1.3。为了研究光斑

大小与间隙的关系,共进行了 15 组试验,焊接参数如表 2 所示。

表 2 热丝填充激光焊接工艺参数

Table 2 Parameters of hot wire filling laser welding

Parameter	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#	15#
Defocusing amount/mm	+5	+5	+5	+5	+5	+10	+10	+10	+10	+10	+16	+16	+16	+16	+16
Joint gap $b$ /mm	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
$P$ /W	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3900	3900	3900	3900	3900
Welding speed $V_w$ /(m/min)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
$I$ /A	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Wire feeding speed $V_f$ /(m/min)	1.5	2.0	2.5	2.9	3.5	2.2	2.4	2.8	3.2	3.5	2.8	3.2	3.4	3.8	4.3

## 2.4 焊接质量评估

试件焊接完成以后,对焊缝表面及截面形貌进行宏观评估,利用金相显微镜对焊缝截面进行金相组织观察,同时利用显微硬度计分别对焊缝、热影响区及母材进行硬度测试,将试件加工成比例拉伸试样,在万能拉伸试验机上进行焊缝强度分析,并对断口进行扫描电镜(SEM)观察,分析查找断裂形成的原因,再利用扫描电镜自带的 X 射线能谱仪对相关试件焊缝进行成分分析。据此研究了针对不同激光光斑直径在不同对接间隙下 316LN 热丝填充激光焊的焊接性能,同时得出不同的光斑直径对应了不同的对接间隙极限。

## 3 试验结果及讨论

### 3.1 焊缝表面及截面形貌

采用填丝激光焊时,激光束首先作用于焊丝,使焊丝熔化,熔化的焊丝吸收激光能量并传递给母材,

还有部分能量被反射和透过焊丝对下面的工件加热。如果在大间隙焊接时,普通填丝激光焊接中必须保证光纤相对位置,最理想的是焊丝插入位于工件表面光束焦斑的中心<sup>[2]</sup>,否则焊丝不能及时熔化,大部分激光束穿过间隙,造成激光能量损失,使焊接过程不稳。如果采用热丝填充激光焊,热丝机对焊丝采用电阻预热,焊丝温度升高,对激光的吸收率大大提高,预热过的焊丝只需要很少的激光能量就可以熔化,大部分能量由焊丝传递给母材,使母材熔化,与熔化的焊丝一起形成焊缝。

图 2 为 3 组不同光斑直径下的焊缝表面形貌。从 3 组试验情况来看,随着光斑直径的增大,焊缝熔宽逐渐增大。在每一组试验中,焊缝表面均未见裂纹和气孔,除了第二组中 10# 件光斑直径为 0.7 mm 左右,间隙达 1.0 mm 时出现焊缝表面严重凹陷,成形变差以外[图 2(j)],其他各组焊缝表面成形良好,且熔宽和余高基本连续一致。在热丝填充

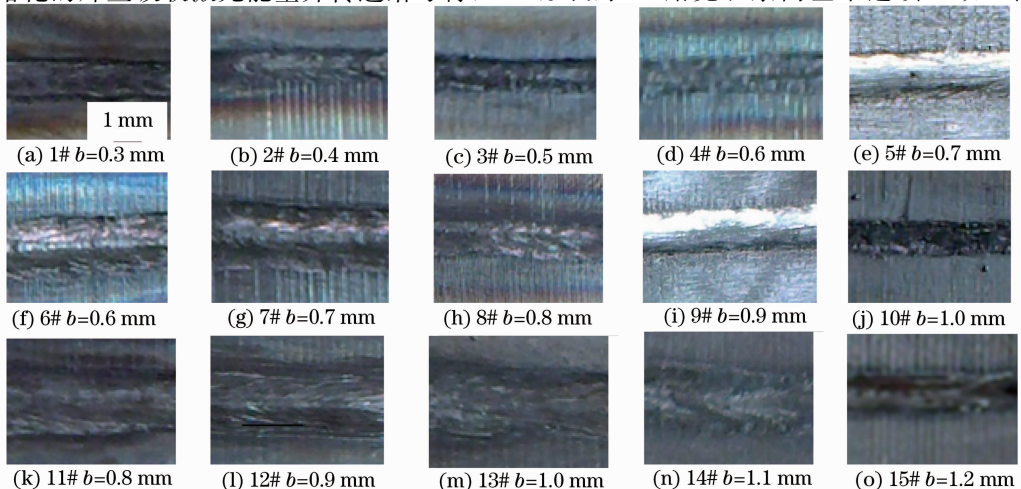


图 2 不同对接间隙的焊缝表面形貌

Fig. 2 Topographies of weld joint surface corresponding to different butt joint gaps

激光焊接, 预热过的焊丝在激光照射下形成熔滴, 熔滴再把热量传递给母材, 同时母材间隙侧壁在透过焊丝的部分激光能量作用下发生熔化, 熔化的侧壁与焊丝熔滴相互融合, 形成焊缝。当光斑直径小于对接间隙量 0.1~0.2 mm 时, 均能得到表面成形良好的焊缝; 当光斑直径小于对接间隙量达到 0.3 mm 时, 焊缝两侧母材出现未完全熔合现象, 其原因是间隙过大, 光斑直径过小, 透过焊丝的激光束容易从间隙中漏出并且熔滴下坠而使背面余高增大, 故对于确定的光斑直径来说, 相应的对接间隙有一个极限, 这个极限即为上述的光斑直径小于对接间隙量

0.1~0.2 mm, 当对接间隙超过这个极限值时, 焊缝表面就会出现凹陷、熔合不良等缺陷, 如图 2(j) 所示。

图 3 为选取的几组不同对接间隙的焊缝宏观截面图, 可知随着对接间隙的增大, 焊缝逐渐变宽。每一组里在光斑直径固定的情况下, 随着间隙的增大, 正面余高逐渐下降, 反面余高逐渐增加, 其原因是当间隙超过光斑直径一定值时, 穿过焊丝的激光束容易从间隙中漏出, 令侧壁熔合不良而使熔池下坠, 如图 3(d) 10# 截面图所示, 正面开始出现凹陷, 反面余高较高。

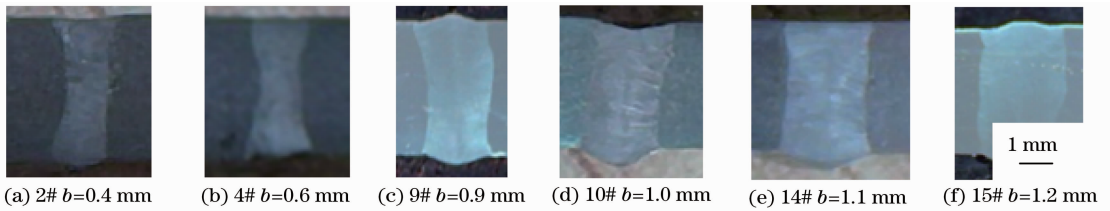


图 3 不同对接间隙的焊缝截面形状

Fig. 3 Topographies of weld joint cross section corresponding to different butt joint gaps

### 3.2 焊缝显微组织分析

利用 Olympus BX51M 金相显微镜对激光焊接接头 13# 试件进行金相显微组织分析, 结果如图 4 所示, 具体的焊接工艺条件如表 2 所示。从图 4(a) 可以看出, 母材为典型单一的  $\gamma$  相, 呈现出均匀细小的等轴晶粒, 并出现孪晶组织, 如图中黑色状, 晶粒内弥散析出微细的铬、铁的碳化物等强化相。考虑到母材的稀释率很低, 焊缝化学成分与焊材基本相同, 通过焊材计算得出的铬与镍当量接近 1:1, 则焊

缝金属从液态到固态都为纯奥氏体组织, 呈现出细小的柱状晶群, 还夹杂着细小的树枝状晶, 如图 4(b) 所示。从图 4(c) 可以看出, 热影响区很窄, 熔合线附近的母材晶粒未见明显长大。由于采用激光热丝焊, 焊接能量相对集中, 焊速快导致焊缝金属冷却速度很快, 使焊缝得到细小的晶粒组织。对接间隙的变化仅对焊缝及热影响区宽度产生一定的影响, 对金相组织无明显影响。

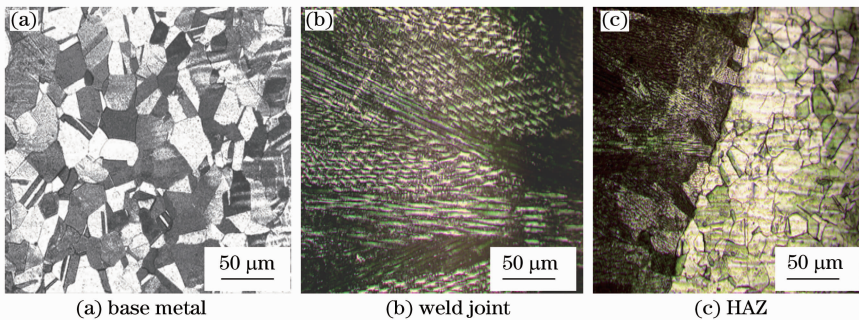


图 4 焊缝各区域金相组织

Fig. 4 Metallographic structures of different zones of weld joint

### 3.3 拉伸试验结果分析

焊缝的抗拉强度是评价焊接质量的一个重要参考依据, 对保证 ITER 线圈盒的整体强度具有重要意义。焊件试样在 600 kN 液压万能试验机上进行拉伸试验, 力的加载速度为 10 mm/min。图 5 为选取的典型不同对接间隙试件的拉伸断裂图, 断裂都在焊缝上。

结合抗拉强度测试结果分析光斑大小与间隙量的关系。抗拉强度值与相对应间隙量和光斑大小如表 3 所示。从表 3 中可知, 在每一组光斑大小固定的情况下, 随着间隙量和送丝速度的增大, 抗拉强度值逐渐增大, 当间隙量过大, 如第 2 组中 10# 试件间隙量超过光斑直径达 0.3 mm 时, 抗拉强度值下降较多。

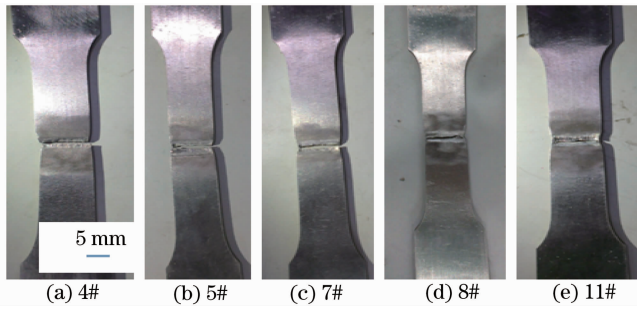


图5 不同对接间隙的焊缝拉伸断裂图

Fig. 5 Weld tensile fractures for different butt joint gaps

表3 拉伸试验结果

Table 3 Results of tensile test

No.	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#	15#
Tensile strength /MPa	640	640	645	650	665	650	656	650	660	625	640	645	645	650	650
Gap /mm	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
Focused spot diameter /mm	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
$V_f/(m/min)$	1.5	2.0	2.5	2.9	3.5	2.2	2.4	2.8	3.2	3.5	2.8	3.2	3.4	3.8	4.3

在热丝填充激光焊接,焊丝由于电阻热的预热仅需要较少的激光能量就能熔化,同时预热过的焊丝能增大对激光的吸收率,减少激光的反射率,即减少了激光功率损失,焊丝能够吸收更多的能量,熔化的焊丝又把吸收的能量更多的传递给母材,与冷丝焊相比,能有效地改善未熔合缺陷<sup>[7]</sup>,并且随着送丝速度的提高,焊缝成形得到改善,从而提高了焊缝的表面质量和抗拉强度值,如表3所示,每一组光斑固定时,抗拉强度随送丝速度的提高而增大。由于对接接头中坡口间隙能起到类似小孔的作用,穿过焊丝对母材加热的激光束作用在坡口侧壁产生壁聚集效应<sup>[10]</sup>。侧壁熔化机理如图6所示,激光束照射到焊丝上,部分激光能量被焊丝吸收,形成熔滴,部分激光束穿过焊丝,在间隙侧壁中被多次反射,与熔化的

的焊丝传递给母材的能量一起使侧壁熔化,熔化的焊丝与侧壁结合形成焊缝。当间隙足够大时,穿过焊丝的大部分激光束会从间隙中漏出,从而造成能量损失,容易出现侧壁熔合不良,具体表现在10#试件的抗拉强度下降幅度较大,就是由于热输入不足而使焊缝出现表面凹陷、融合不良等缺陷。

一般学者在研究激光焊接时,通常选择与间隙相当的光斑直径,但在热丝填充激光焊接,根据上述焊丝下面坡口侧壁熔化机理可知,对接间隙量可以大于激光光斑直径,如对接间隙大于激光光斑直径0.1~0.2 mm时,焊缝抗拉强度值较高,但当大于光斑直径达到0.3 mm时,焊缝抗拉强度值下降较多。

### 3.4 硬度试验结果分析

选用试验力500 gf(1 gf=0.0098067 N),保荷时间为15 s,利用DHV-1000Z型显微维氏硬度计分别对3#、12#试件进行硬度测试,距试件上表面2.5 mm位置处,从焊缝中心开始以0.2 mm间隔沿横向测量13个点,由于热影响区很窄,仅取3个点,焊缝区及母材区各取5个点。图7为测试结果,焊缝区、热影响区及母材区的硬度基本相当,母材区硬度稍高,是组织中出现了强化相的缘故。通常材料的硬度与强度存在一定的经验关系,根据GB/T1172-1999《黑色金属硬度与强度换算法》可知,硬度范围为187~210 HV,相当于强度为724~640 MPa。从12#试件的硬度测试可知,在焊缝区有个别区域硬度较高,是由于激光焊接冷却速度较

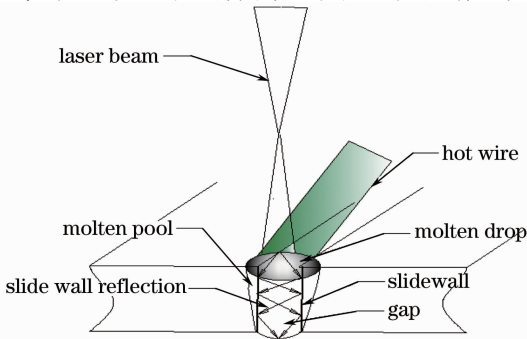


图6 对接间隙热丝填充激光焊接中侧壁熔合示意图

Fig. 6 Sidewall fusion in butt gap laser welding with hot wire

快导致焊缝区域元素发生偏析,在某些部位形成了较硬的碳化物,经电镜分析证实了有析出物存在。

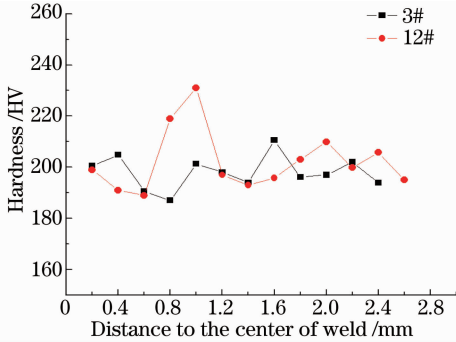


图 7 焊接接头硬度

Fig. 7 Hardness of weld joints

### 3.5 接头断口特征及 X 射线能谱分析

利用扫描电子显微镜对 10#、12# 试件断口进行观察,图 8 所示为断口的微观形貌。

10# 试件断口不光滑,并有一些夹杂物,韧窝深浅不一致,尺寸大小也不均匀;12# 试件断口光洁,韧窝深浅均匀一致、尺寸大小基本均匀。根据断口学理论,如果韧窝的尺寸大小比较均匀,深浅一致,说明其塑性及强韧性较均匀;如果大小韧窝错乱分布,深浅不一,说明其塑韧性不均匀,存在薄弱点,容易发生断裂,从断口学上解释了 10# 试件抗拉强度低的原因。由于两者韧窝较为明显,因此均为塑性断裂。

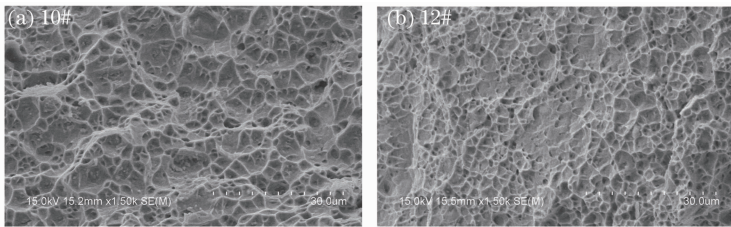


图 8 不同断面扫描电镜形貌

Fig. 8 SEM micrographs of the fracture surface

利用扫描电镜观察到了接头韧窝断口上的第二相粒子或沉淀相,如图 9 所示,利用扫描电镜自带的 X 射线能谱仪对 12# 试件的第二相粒子区域进行了分析(图 10),结果如表 4 所示。

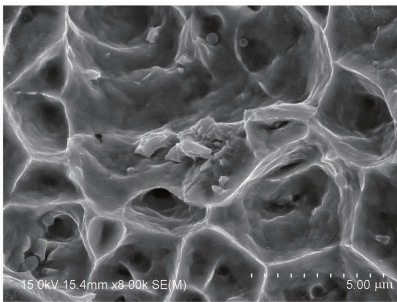


图 9 12# 试件断口上出现的第二相粒子

Fig. 9 Second-phase particles of the fracture in 12# sample

由表 4 可知,第二相粒子区域主要由 C、Cr、Fe、N 等元素组成,由于间隙较大,热输入增大,冷却时间比无间隙激光焊延长,有利于 C、N 化合物的析出,同时奥氏体不锈钢又容易发生偏析,可以推测是  $M_{23}C_6$  与  $Cr_2N$  的析出,这些少量脆硬碳化物的析出提高了该处的强度、硬度,证实了硬度测试时焊缝个别区域硬度较高的原因是焊接导致焊缝区域元素偏析,某些部位形成了较硬的析出物。

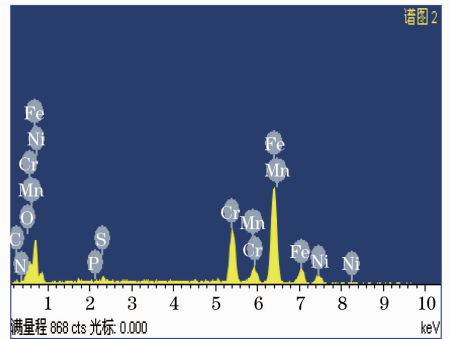


图 10 能谱分析元素含量分布

Fig. 10 Energy spectrum analysis of element content distribution

表 4 12# 试件主要元素含量(质量分数,%)

Table 4 Primary element contents of 12# sample (mass fraction, %)

C	N	P	S	Cr	Ni	Fe	Mn
6.31	3.3	0.26	0.52	19.2	8.74	57.7	3.9

## 4 结 论

1) 采用热丝填充光纤激光焊对 5 mm 厚的 316LN 在 +5、+10、+16 mm 的光斑直径下分别对不同对接间隙情况进行焊接试验,工艺参数合适时,光斑直径可以在小于对接间隙量 0.1~0.2 mm 的

情况下得到表面成形较好且抗拉强度值较高的焊缝,当光斑直径小于对接间隙量达到 0.3 mm 时,焊缝表面成形变差,抗拉强度值下降较多。

2) 对于大对接间隙的热丝填充光纤激光焊,熔化的焊丝传递给母材的能量和透过焊丝的激光束对焊丝下面的坡口间隙侧壁形成多次反射是侧壁融合的主要原因,焊缝组织金相分析表明焊缝内部未发现未熔合现象,且组织较为均匀细密,呈现单一的  $\gamma$  相,对接间隙变化对组织无明显影响。硬度测试表明焊缝中心硬度与母材大体相当,个别区域硬度高于母材是由于析出物所致,通过 X 射线能谱仪对断口成分分析也证明了这一点。拉伸断裂均为塑性断裂。

### 参 考 文 献

- 1 N Holtkamp. An overview of the ITER project[J]. Fusion Eng Des, 2007, 82: 427-434.
- 2 Chen Wuzhu. Quality Control of Laser Welding and Cutting[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010.  
陈武柱. 激光焊接与切割质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- 3 Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plates[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.  
吴世凯, 肖荣诗, 陈 凯. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2422-2425.
- 4 T Jokinen, V Kujanpaa. High power Nd:YAG laser welding manufacturing of vacuum vessel of fusion reacto[J]. Fusion Eng Des, 2003, 69: 349-353.
- 5 Wen Peng, Zheng Shiqing, Shinozaki Kenji, *et al.*. Experimental researchon laser narrow gap welding with filling hot wire[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1103004.  
温 鹏, 郑世卿, 荻崎贤二, 等. 填充热丝激光窄间隙焊接的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1103004.
- 6 Zheng Shiqing, Wen Peng, Shan Jiguo. Hot wire laser weld fusion uniformity ratio and micro components of weld depth direction[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(12): 45-48.  
郑世卿, 温 鹏, 单际国. 激光热丝焊缝熔合比和焊缝深度方向的微观成分均匀性[J]. 焊接学报, 2012, 33(12): 45-48.
- 7 Li Liqun, Tao Wang, Zhu Xianliang. Wire filling laser multilayer welding of high strength steel thick plate[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1251-1255.  
李俐群, 陶 汪, 朱先亮. 厚板高强度钢激光填丝多层焊工艺[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1251-1255.
- 8 Zhang Yi, Tan Lipeng, Zhang Chenglei. Research on gap margin in laser butt welding of high-strength automobile steel with hot wire filler[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0703003.  
张 屹, 谭力鹏, 张成磊. 车用高强度钢激光填充热丝对接焊间隙裕度研究[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0703003.
- 9 Chen Genyu, Chen Fei, Zhang Yi, *et al.*. Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603013.  
陈根余, 陈 飞, 张 屹, 等. 对接间隙对车用高强度钢光纤激光焊接的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603013.
- 10 Y Arata, I Miyamoto. Some fundamental properties of high power CO<sub>2</sub> laser beam as a heat source[J]. Trans JWRI, 1972, 3(1): 1-20.

栏目编辑: 史 敏