

SUS304 不锈钢窄间隙激光填丝焊性能

徐国建¹ 钟立明¹ 杭争翔¹ 李 挺¹ 邢 飞² 石 磊³ 唱丽丽²

(¹沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870; ²鞍山煜宸科技有限公司, 辽宁 鞍山 114044)
³沈阳新松机器人自动化股份有限公司激光技术事业部, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 采用窄间隙全固态光纤激光填充热丝焊接方法取代了以往的窄间隙非熔化极气体保护焊(TIG)填充热丝焊接方法,焊接板厚为 20 mm,材质为 SUS304 奥氏体不锈钢。初步确定适合于窄间隙激光填充热丝焊接的坡口形式和焊接工艺参数;通过试验,研究分析焊缝金属组织中气孔和结晶裂纹产生的原因;调整工艺参数,在优化后的最佳工艺参数下,获得了热影响区域小、表面成形性好、无焊接缺陷的焊接接头;焊缝金属为细小的奥氏体柱状晶,与母材形成良好的连接;焊接变形小,满足了焊接变形要求;焊缝金属的显微硬度略高于母材,拉伸性能和弯曲性能均满足试验要求,获得了力学性能良好的焊接接头。

关键词 激光技术; 厚板奥氏体不锈钢; 光纤激光填丝焊接; 气孔; 结晶裂纹; 力学性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.1003001

Performance of Narrow Gap Laser Welding with Filling Wire for SUS304 Stainless Steel

Xu Guojian¹ Zhong Liming¹ Hang Zhengxiang¹ Li Ting¹ Xing Fei²
Shi Lei³ Chang Lili²

¹School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China
²Anshan Raycham Technology Co., Ltd, Anshan, Liaoning 114044, China
³Laser Technology Department, Shenyang Siasun Robot & Automation Co., Ltd, Shenyang, Liaoning 110168, China

Abstract The narrow-gap solid fiber laser welding with filling hot wire replaces the previous narrow gap tungsten inert gas (TIG) welding. The thickness of the welding is 20 mm and the material is SUS304 austenitic stainless steel. Preliminary study shows that the groove form and the welding process parameters are suitable for narrow gap laser welding with filling hot wire. The causes of blowhole and crystallization crack in the weld metal are analyzed through experiments and the process parameters are adjusted. Under the optimum process parameters, smaller heat affected zone, better surface formability are obtained, and there is no welding defects in the welded joints. The weld metal is fine austenite columnar crystals, which forms a good connection with the base material. Welding deformation is small enough to satisfy the requirement. The weld metal is slightly micro harder than the base metal. The tensile and bending properties meet the test requirements, obtaining good mechanical properties of the welded joints.

Key words laser technique; thick plate austenitic stainless steel; fiber laser welding with filling wire; blowhole; crystallization crack; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 140.3580; 160.3900

1 引 言

近年来随着激光技术的成熟,激光加工在工业中获得日益广泛的应用^[1-3]。厚板奥氏体不锈钢焊接由于其自身焊接特性,焊接工艺处理一直是一个难

点。传统的焊接方式由于焊接热影响区大、坡口间隙大等诸多原因,导致很难获得良好的焊接接头,而激光焊接具有能量集中、高的深宽比、热影响区域小等优势,在解决这些问题上效果良好^[4-8]。激光填丝多

收稿日期: 2013-04-07; 收到修改稿日期: 2013-05-04

基金项目: 辽宁省自然科学基金(20092047)

作者简介: 徐国建(1959-),男,博士,教授,主要从事激光加工工艺及成套加工设备等方面的研究。

E-mail: xuguojian1959@hotmail.com

层焊通过填充焊丝可使焊缝的成分根据要求进行调整,获得要求的使用性能;在选择焊丝直径的基础上应注意焊接变形,同时合理设计坡口形式^[9-11]。

研究激光填丝焊对 20 mm 厚的奥氏体不锈钢 SUS304 进行焊接试验,焊接技术要求为:可适应大尺寸工件焊接;对不锈钢 SUS304,全熔焊深可达 20 mm;焊缝既要有足够的强度又要有良好的密封性;焊接试样整体焊接角变形量应控制在 2 mm 以内。利用窄间隙填充热丝光纤激光焊接方法取代以往的窄间隙填充热丝非熔化极气体保护焊(TIG)焊接方法,可以有效地提高焊接质量和减少焊接变形。试验获得了具有一定学术价值的试验结果。

2 试验设备与材料

2.1 试验设备

试验设备系统主要由全固态光纤激光器、控制系统、送(热)丝系统、机器人和激光填丝焊接头等组成。窄间隙激光填丝焊接系统照片如图 1 所示。光纤激光器型号为 IPG YLR-4000,其最大输出功率为 4 kW,操作光纤的直径为 200 μm ,聚焦镜焦距选为 500 mm,准直镜焦距选为 150 mm,焊接保护气体为氩气(Ar),送(热)丝系统采用 VR15504R/F++ Robot 和 TS5000R,机器人型号为 KUKA KR60HA,激光填丝焊接头为自有知识产权的产品。该系统为世界第一台窄间隙填充热丝激光焊接系统。

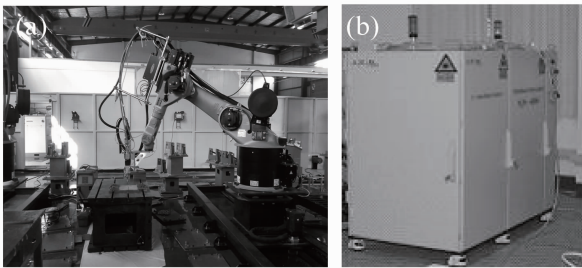


图 1 激光焊接系统照片。(a) 机器人系统;
(b) 4000 W 固态光纤激光器

Fig. 1 Photos of laser welding setup. (a) Robot system;
(b) 4000 W solid fiber laser

2.2 试验材料

试验板材为 SUS304(质量分数为 0.08% C、18.00% Cr、9.00% Ni、0.80% Si、2.00% Mn、0.03% S、0.03% P)奥氏体不锈钢,尺寸为 300 mm×150 mm×20 mm,并带有坡口。焊丝采用了 ER308LSi(质量分数为 0.024% C、1.65% Mn、0.82% Si、20.10%

Cr、10.33% Ni、0.02% S、0.03% P)实芯焊丝,直径为 $\Phi 1.2$ mm。

3 焊前准备工作

3.1 工件坡口

为满足激光束和焊丝能顺利进入到坡口内,保护气体送至焊接位置处的前提下;坡口尺寸越小,向焊件的热输入量越小,焊后所产生的焊接变形和焊接残余应力越小;根据 4000 W 光纤激光的熔透能力,经过试验确定的焊接坡口的尺寸形状如图 2 所示,板厚为 20 mm,钝边尺寸为 5 mm,底面坡口边长为 2 mm、表面坡口边长为 3.6 mm。

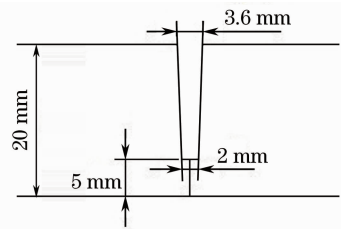


图 2 坡口示意图

Fig. 2 Schematic diagram of groove

3.2 焊前预处理

1) 工件清洗:先用钢丝刷清除焊接试件正面和反面距离焊缝中心 20 mm 区域内的表面氧化物,后用压缩空气吹掉焊道表面杂质,然后利用丙酮溶液清洗焊道,将焊缝表面的氧化膜、油污及杂质清除。

2) 工件装夹:激光填丝焊对焊件的装配质量要求非常高,应尽可能地减少错边,为了防止工件的变形,合理利用试验平台上的夹具对焊接试件进行固定。

4 试验结果与讨论

4.1 焊接工艺参数

试验过程中,焊接工艺参数包括激光输出功率、离焦量、焊接速度、送丝速度、保护气体流量、焊丝电流及焊丝电压等。经过大量试验,获得具有代表性的焊接工艺参数如表 1 所示。其中 1 号试样钝边和盖面焊缝的焊接参数分别为序号 a 和 b,2 号试样钝边和盖面焊缝的焊接参数分别为序号 c 和 d。1 号试样焊后,钝边焊缝没有焊接缺陷存在,盖面焊缝有焊接缺陷(气孔和裂纹)存在;2 号试样焊后,钝边和盖面焊缝均无焊接缺陷存在。

表1 焊接工艺参数

Table 1 Welding process parameters

Sample No.	No.	Laser power /kW	Defocusing distance /mm	Welding speed /(m/min)	Wire feed rate /(m/min)	Gas flow rate /(m/min)	Wire current /A	Wire voltage /V	Wire extension /mm	Wire feed angle /(°)
1	a	4	0	0.8	1.5	15	150	8	28	45
	b	4	+30	0.5	3	15	250	10	28	45
2	c	4	0	0.8	1.5	25	150	8	28	45
	d	4	+30	1.5	4.3	25	250	10	28	45

4.2 焊接接头的组织和性能

1号试样焊接接头的横断面照片如图3所示。焊缝金属由6层构成,钝边焊后焊缝厚度约为6 mm,盖面焊缝为5层,每层焊缝平均厚度约为3 mm。焊后焊接角变形量约为1.20 mm,满足了设计要求。

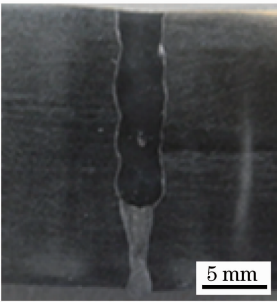


图3 焊接接头横断面照片

Fig. 3 Cross-section photo of the welded joints

但是,1号试样盖面焊缝中发现有气孔和裂纹存在,其焊缝横断面中气孔和裂纹照片如图4(a)~(c)所示。

通过对1号试样焊缝中气孔的分析,初步推测气孔是由保护气体中的水分和氢气形成的氢气孔。因为1号试样焊接时,采用了纯度较低(99.8%)的工业纯氩(Ar),其中含有较多的水分和氢气。形成原因有如下几方面:1) 不锈钢由液态转变为固态时,氢的溶解度急剧下降,导致熔池中产生较多的氢气孔^[12];2) 激光焊接过程中,热输入量小导致冷却

速度快,氢气泡来不及上浮;3) 焊接速度较慢导致单层盖面焊缝的厚度较大,不利于氢气孔的上浮;4) 由于窄间隙保护气体很难起到有效保护效果,增大了焊缝产生氢气孔的倾向。由于上述4点原因,在不锈钢焊接过程中,很容易产生氢气孔。

另外,通过对1号试样焊缝金属的裂纹分析,初步推测裂纹为结晶裂纹。母材金属和焊丝中都含有一定量的硫(S)和磷(P),但是,S和P的含量都没有超过其在奥氏体中的溶解度,按常理不会产生结晶裂纹。

本次试验的1号试样焊缝金属的组织基本上是由奥氏体构成,虽然S和P的溶解度都没有超过其溶解度,但是,由于焊缝金属的含氢量较高,并产生了大量气孔。焊缝金属过饱和的含氢量改变了S和P的溶解度,也就是说使S和P的溶解度降低,在一定程度上加剧了低熔点共晶的形成,使结晶裂纹敏感性提高。从裂纹的形态[如图4(b)和(c)]推测裂纹属于结晶裂纹。焊缝金属的裂纹走向基本上是沿着柱状晶的晶界和焊缝的中心位置。

1号试样结晶裂纹形成的原因有如下几个方面:1) 奥氏体不锈钢在凝固过程中,是以粗大的柱状晶生长,在生长的过程中将溶解度较低的S和P推移到固液界面附近的液相中,形成低熔点高共晶物—液态薄膜^[12](如Fe+FeS,熔点为985℃;Fe+Fe₃P,熔点为1050℃;Ni+Ni₃S₂,熔点为645℃;Ni₃P+Fe,熔点为880℃);2) 由于焊接速度较慢,

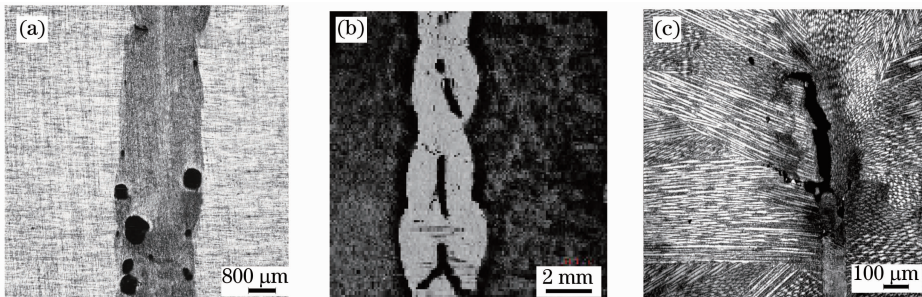


图4 1号试样焊缝中焊接缺陷形态。(a) 气孔;(b) 宏观裂纹;(c) 结晶裂纹

Fig. 4 Welding defects form in weld of sample 1. (a) Blowhole; (b) macrocrack; (c) crystallization crack

导致凝固时间较长,促使柱状晶的粗大化,也使得液态薄膜的形成量增加;3) 由于焊接残余应力的存在,很容易沿着液态薄膜产生开裂。由于上述3点原因,在不锈钢焊接过程中,增大了结晶裂纹的敏感性。

为了消除上述盖面焊缝中的气孔和裂纹,考虑到激光填丝焊的特点,分析可知多层焊每层焊缝厚度对焊缝的中气孔和裂纹起着至关重要的作用。故在2号试样焊接过程中,主要以提高焊接速度来解决该问题,次之增加了保护气体 Ar 的纯度(体积分数为 99.99%)和流量。2号试样优化后的最佳焊接

工艺参数如表1中序号c和d所示,序号c为钝边焊缝焊接工艺参数,序号d为盖面焊缝焊接工艺参数。2号试样焊缝金属由11层构成,钝边焊后焊缝厚度约为6mm,盖面焊缝为10层,每层焊缝平均厚度约为1.5mm,焊接后的焊缝正面、背面和横断面照片如图5所示,通过照片可知获得了比较完美的焊缝成形。焊后焊接角变形量约为0.92mm,小于1号试样的角变形量,这是由于随着焊接层数的增加,向母材的热输入量减少,由此产生的焊接横向收缩量减小,从而导致角变形量减小。



图5 2号试样的焊缝形状。(a)正面;(b)背面;(c)横断面

Fig.5 Weld shape of sample 2. (a) Positive; (b) back; (c) cross-section

2号试样焊缝中心附近及熔合线附近(左边为母材金属,右边为焊缝金属)的金相显微组织如图6所示。焊缝中心附近仍由柱状奥氏体组织构成,但是晶粒尺寸小于1号试样,并没有发现气孔及裂纹等焊接缺陷。熔合线附近的金相显微组织为外延结晶方式生长,与母材之间形成良好冶金结合,并无缺陷。

测国标 GB3323-2000 的 I 级标准。

4.3 焊接接头力学性能

4.3.1 焊接接头硬度

采用数显维氏硬度计 HVS-50,对2号试样焊接接头硬度进行了测试。测量时,距离试样表面5mm,并从焊缝中心线开始向着母材方向测试,测试间隔为0.5mm。获得的焊接接头宏观硬度分布如图8所示。

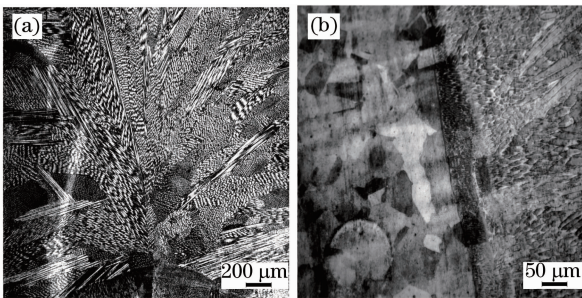


图6 2号试样焊接接头的金相显微组织。(a)焊缝中心;(b)熔合线附近

Fig.6 Metallographic microstructure of welded joints for the sample 2. (a) Weld center; (b) near the fusion line

2号试样焊缝的X射线检测结果如图7所示。结果表明,焊缝中没有缺陷存在,达到了X射线检

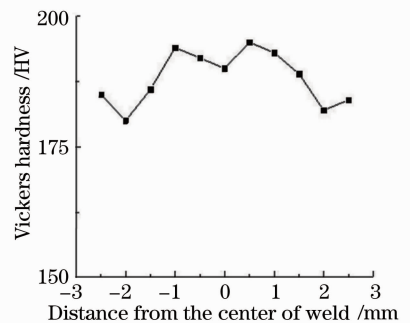


图8 2号试样焊接接头的硬度分布

Fig.8 Curve of welding joints hardness for sample 2

由试验结果可知,焊缝金属的硬度约为190HV,母材金属的硬度约为180HV。两者硬度的差别不大,这是由于焊缝金属和母材金属的组织都属于奥氏体组织。但是由于焊丝中的Cr、Ni和Si含量比母材金属高,故固溶强化效果比母材强;同时加上激光焊的快速加热和快速冷却的热循环作用,使得焊

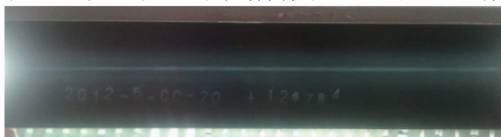


图7 2号试样焊缝的X射线检测

Fig.7 X-ray detection of the weld for sample 2

缝组织比母材组织细小^[3],晶界强化效果增大,所以硬度值比母材略高一些。

4.3.2 焊接接头的机械性能

采用 WDW-100D 电子万能力学试验机,对 2 号试样焊接接头的拉伸性能进行了测试,其拉伸试样的外观照片如图 9 所示。拉伸试验发现断裂全部发生在母材上,焊缝的强度要远高于母材。3 个拉伸试样的抗拉强度分别为 630.5、623.1、622.1 MPa,延伸率分别为 48.0%、46.8%、47.5%。焊缝金属强度比母材金属强度高,其原因是焊丝中的 Cr、Ni 和 Si 含量比母材金属高,故固溶强化效果比母材强;同时加上激光焊的快速加热和快速冷却的热循环作用,使得焊缝组织比母材组织细小^[3],晶界强化效果增大,故获得了比母材高的抗拉强度。



图 9 2 号试样的拉伸试件形貌

Fig. 9 Morphology of tensible specimen of sample 2

采用 WDW-100D 型电子万能力学试验机,对 2 号试样焊接接头的面弯和背弯性能进行了测试,其弯曲试样的外观照片如图 10 所示。弯曲角度均为 180°,弯曲后检验结果未发现裂纹产生,满足了客户的要求。虽然由于焊丝中的 Cr、Ni 和 Si 含量比母材金属高,使得焊缝金属的强度提高,但是其塑性并没有下降,这主要是由于焊缝金属中 Ni 含量高于母材,保持了焊缝金属组织基本上由奥氏体构成;另外,激光窄间隙填充热丝焊接工艺中,高能量密度的激光束,在窄间隙坡口中产生强烈的等离子体,使得焊缝金属与母材金属之间融合的非常完美,避免了熔合线附近的焊接缺陷产生。综上所述,2 号试样的焊接接头具有较高的塑性。

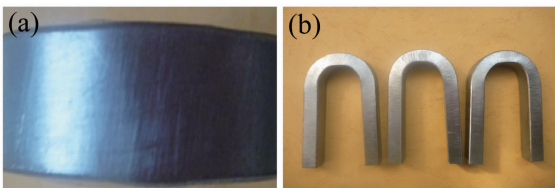


图 10 2 号试样的弯曲试件形貌。(a) 面弯;(b) 背弯

Fig. 10 Morphology of the bending specimen of sample 2.

(a) Positive bend; (b) back bend

5 结 论

1) 本次试验条件下的最佳坡口尺为钝边约为 5 mm、V 型坡口底边宽约为 2 mm、V 型坡口表面宽约为 3.6 mm。

2) 本次试验的最佳焊接工艺参数为钝边焊缝的焊接参数是激光输出功率为 4 kW、离焦量为 0 mm、焊接速度为 0.8 m/min、填丝速度为 1.5 m/min、保护气体流量为 25 m/min、焊丝电流为 150 A、焊丝电压为 8 V、焊丝的伸出长度为 28 mm、焊丝直径为 1.2 mm、送丝角度为 45°;盖面焊缝的焊接参数是激光输出功率为 4 kW、离焦量为 +30 mm、焊接速度为 1.5 m/min、填丝速度为 4.3 m/min、保护气体流量为 25 m/min、焊丝电流为 250 A、焊丝电压为 10 V、焊丝的伸出长度为 28 mm、焊丝直径为 1.2 mm、送丝角度为 45°。

3) 在本次最佳焊接工艺参数条件下,获得了无气孔和结晶裂纹的焊缝金属;焊接角变形量小于设计要求;拉伸试样断在母材,弯曲性能合格。

4) 通过试验证实,窄间隙全固态激光填充热丝焊接方法可以完全取代以往的窄间隙 TIG 填充热丝焊接方法,并能获得更加优异的焊接接头。

参 考 文 献

- 1 Wang Youliang. Latest application fields of laser processing[J]. Applied Laser, 2005, 25(5): 329-332.
王又良. 激光加工的最新应用领域[J]. 应用激光, 2005, 25(5): 329-332.
- 2 P Kah. Overview of the exploration status of laser-arc hybrid welding processes[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2012, 30(2): 112-132.
- 3 Xu Guojian, Liu Xiangyu, Hang Zhengxiang, et al.. Laser-MIG hybrid welding performance of spheroidal graphite cast iron and ferrite stainless steel [J]. J Shenyang University of Technology, 2012, 34(5): 496-503.
徐国建, 刘祥宇, 杭争翔, 等. 球墨铸铁和铁素体不锈钢的激光-MIG 复合焊接性能[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(5): 496-503.
- 4 Pu Jixiong. Beam quality and focusing of high-power laser-beam[J]. J Huaqiao University, 1996, 17(3): 236-239.
蒲继雄. 高功率激光光束的光束质量及聚焦[J]. 华侨大学学报, 1996, 17(3): 236-239.
- 5 Li Liqun, Zhang Liang, Dai Jingming. Numerical simulation of temperature and stress fields in wire filling laser multilayer welding [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1003002.
李俐群, 张亮, 戴景明. 激光填丝多层焊温度场和应力场的数值模拟[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1003002.
- 6 He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(5): 595-622.
何飞, 程亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿[J]. 中国激光, 2007, 34(5): 595-622.
- 7 R Poozesh, A Norouzy, A H Golshan, et al.. A novel method for stripping cladding lights in high power fiber lasers and amplifiers[J]. J Lightwave Technology, 2012, 30(20): 3199-3202.

- 8 Song Weilian. The development of laser processing technology[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(s1): 755-758.
宋威廉. 激光加工技术的发展[J]. *激光与红外*, 2006, 36(s1): 755-758.
- 9 Chen Wuzhu. *Quality Control of Laser Welding and Cutting*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010. 156-173.
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. 156-173.
- 10 Wen Peng, Zheng Shiqing, Shinozaki Kenji, *et al.*. Experimental research on 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.
- 11 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.
- 12 Zhang Wenyue. *Welding Metallurgy* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010. 37-68.
张文钺. *焊接冶金学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010. 37-68.

栏目编辑: 宋梅梅