DOI: 10.3901/JME.2015.20.094

机械振动对激光焊接接头组织的影响*

彭必荣¹ 卢庆华^{1,2} 何晓峰¹ 郭 崇¹

(1. 上海工程技术大学材料工程学院 上海 201620;

2. 上海工程技术大学上海市高强激光智能加工装备关键技术产学研开发中心 上海 201620)

摘要: 振动焊接工艺能有效细化接头组织晶粒,降低残余应力,提高焊接质量。为了研究振动焊接工艺在激光焊接方面的应用,选用 316 不锈钢作为试验材料,利用机械振动辅助激光焊接的工艺方法,通过改变机械振动参数和焊接速度,利用光学显微镜和扫描电镜观察焊后接头组织,对比分析不同振动频率和焊接速度下接头的微观组织形貌。结果表明,机械振动可以细化焊后组织中形成的柱状晶,使柱状枝晶破碎且向不同方向生长,晶轴间与焊缝中心处的等轴晶增加。提高焊接速度后,振动的加入能够细化焊缝区出现的粗大柱状晶。同时,振动可以减少焊后在奥氏体基体晶界处形成的网状高温铁素体和点状碳化物,使其趋于弥散。试验还对焊接接头进行显微硬度测试,发现振动焊接下得到的焊缝区接头组织硬度较高,且较高共振频率下硬度增加明显。

关键词: 机械振动; 激光焊接; 微观组织

中图分类号: TG456

Effects of Mechanical Vibration on Microstructure of Laser Welded Joint

PENG Birong¹ LU Qinghua^{1,2} HE Xiaofeng¹ GUO Chong¹

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620;

2. Shanghai Research & Development Center for Key Technologies of Intelligent Equipments of Ultra-Intense Laser Processing, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620)

Abstract: The welding quality of welded joints can be improved effectively with vibratory welding process. To study the application of vibratory welding process on laser welding, 316 stainless steel is selected for the laser-vibration welding experiments. According to changing the vibration parameters and welding speeds, the microstructures of welded joints are observed with optical and scanning electron microscope, and are analyzed by contrast in different welding speeds and vibration frequencies. The results show that the columnar dendrites formed after welding are refined. The equiaxed dendrites in the center of weld bead and between the crystal axes are increasing. Meanwhile, the net-like σ -Fe and the dot-like carbides on the grain boundary of austenitic substrate are reduced and more diffuse with the mechanical vibration. In addition, microhardness test of the welded joints is conducted. The hardness of weld bead is higher with vibratory welding than that without vibration. It can also be found that the hardness is dramatically increased at a high resonance frequency.

Key words: mechanical vibration; laser welding; microstructure

0 前言

振动焊接(Vibratory welding, VW)是在振动时效(Vibratory stress relief, VSR)基础上发展起来的一种焊接工艺^[1],它是在正常焊接过程中给焊接工件施加激振力,使焊件振动,改变晶粒生长状况,使晶粒破碎,组织细化,从而降低残余应力^[2-3],提高焊

接质量。由于振动焊接降低了工件焊后的残余应力,焊接工艺上能够省去焊后调整的工序,从而缩短了生产周期,降低了生产成本^[1]。针对振动焊接,国内外进行了不少研究,其机理逐渐被人们认识。在国外,振动焊接称作焊接调整^[4],相关的研究较多。PRAKASH 等^[5]分析了振动焊接条件下焊接接头微观组织和力学性能的变化,GOVINDARAO 等^[6-7]研究发现振动焊接工艺能够提高对接接头剪切强度和抗拉强度,MUNSI 等^[8-9]研究了振动焊接后焊件冷却的方法和残余应力的分布。这种技术在国外已

* 国家自然科学基金资助项目(51305253)。20140806 收到初稿,20150126 收到修改稿

趋于成熟,目前已应用到规范所涉及的焊件中。在国内,大连理工大学研究振动焊接较早,刘峰^[10]研究了振动对焊接裂纹的影响,发现振动焊接工艺减少了焊接裂纹的形成,陈金涛等^[11]发现振动焊接工艺能提高焊缝的力学性能。之前研究的振动焊接大多是基于电弧焊,对激光焊接上施加振动研究的却很少。激光焊接能量密度高,焊后工件残余应力及变形都很小,使得这种焊接工艺在越来越多领域应用^[12]。但由于焊后冷却速度很快,焊接接头呈“铸态组织”以柱状晶向焊缝中心生长,且方向一致,使得接头组织在后续机械加工时出现各向异性。现有研究表明,加入机械振动后,柱状晶在生长时晶粒被打断,会向不同方向生长,使焊缝情况有所改善。本文采用对比试验的方法将机械振动同激光焊接结合起来,研究分析了振动激光焊接和常规激光焊接焊后的组织情况,对比了不同振动频率对焊接接头微观组织的影响,为振动焊接这项技术在工业生产中应用打下基础。

1 试验过程与方法

1.1 试验材料与平台

选用 316 不锈钢作为试验材料,其化学成分如表 1 所示,试件尺寸为 170 mm×30 mm×3 mm。

表 1 316 不锈钢化学成分(质量分数) %

元素	C	Si	Mn	P
质量分数	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035
元素	S	Ni	Cr	Mo
质量分数	≤0.03	10.0~14.0	16.0~18.5	2.0~3.0

激振系统选用济南辉腾机电设备有限公司生产的 HTY-02 型三维全自动振动时效设备,激振器与试验台固定,为试验平台提供激振力。采用 IPG-YLS-5000 型光纤激光焊接系统对试件进行焊接,试验系统如图 1 所示。

图 1 试验系统示意图

1.2 振动焊接试验

固定激振器中电动机转子偏心距,采用扫频方式找到试验平台的两个共振频率:71.67 Hz 和 140.00 Hz,此时加速度传感器测得振动加速度分别是 120 m/s² 和 64 m/s²,再选取一个中间频率 88.33 Hz(对应加速度为 80 m/s²),在无振、共振和非共振三种情况下进行激光焊接试验。共 8 个试样,激光功率均为 3 500 W,离焦量均为-5 mm,每种振动情况下用两种焊接速度(0.020 m/s 和 0.025 m/s)施焊,试验参数见表 2。

表 2 焊接工艺参数

试件编号	振动频率 f/Hz	加速度 $a/(\text{m/s}^2)$	焊接速度 $v/(\text{m/s})$
20-1	0	0	0.020
20-2	71.67	120	0.020
20-3	88.33	80	0.020
20-4	140.00	64	0.020
25-1	0	0	0.025
25-2	71.67	120	0.025
25-3	88.33	80	0.025
25-4	140.00	64	0.025

1.3 显微组织分析

用线切割方法选取焊接横截面作金相磨制面,用王水腐蚀,用 VHX-600K 型超景深数码显微镜进行接头金相组织观察。然后选取 20-1、20-2、20-3、20-4 号试样,用 S-3400N 型扫描电子显微镜观察其显微组织。

1.4 显微硬度测试

用 HXD-1000TMSC/LCD 型显微硬度测试仪测量 20-1、20-2、20-3、20-4 试样焊缝区显微硬度,加载载荷为 1.961 N,加载时间为 15 s,硬度测量线垂直于焊缝中心线,距焊缝表面 0.1 mm,从一侧母材开始打点,每相隔 0.1 mm 打一点,直到另一端母材。

2 试验结果

2.1 金相组织

无振动条件下激光焊接接头金相组织如图 2a、2b 所示。观察发现:316 不锈钢原始母材为形状规则、整齐的等轴晶,激光焊接后,金属由两侧向焊缝中心熔合,热影响区(Heat affected zone, HAZ)很窄,焊缝与母材间会形成一定数量的细晶组织,晶粒细小且不规则。焊缝晶粒以树枝状方式向中心生长,呈明显的柱状晶,晶粒细长,方向整齐,每条晶粒近乎相互平行,柱状晶间存在少量的等轴晶。焊缝中心处有一条比较明显的中心线,周围存在一个较小的等轴晶区。振动条件下激光焊接接头金相

组织如图 2c~2h 所示, 与图 2a、2b 对比发现: 施加振动后, 焊缝与母材间细晶组织区变大, 频率为 140.00 Hz(20-4 号试样)时, 细晶组织区最大, 在另一个共振频率 71.67 Hz(20-2 号试样)下, 细晶区较非共振情况(20-3 号试样)大。晶粒同样以树枝状方式

向焊缝中心生长, 柱状晶一次晶轴变粗, 二次晶轴增多变细, 晶枝朝向各异, 整体向不同方向生长, 同时枝晶间细小等轴晶的数量大大增加, 焊缝中心处中心线更加明显, 等轴晶区域变大, 共振且频率大时, 上述现象更加明显。

图 2 焊接接头金相组织

在其他焊接工艺不变的情况下, 将焊接速度由 0.020 m/s 提高到 0.025 m/s, 金相组织如图 3 所示。可以发现: 提高焊接速度后, 焊缝区柱状晶组织晶枝粗大。不加振动时, 焊速提高, 向中心生长的柱状晶变粗, 分枝减少, 二次晶轴较粗, 晶间的等轴晶少, 形状不规则。施加振动时, 焊速增加, 柱状晶粗化情况会有所缓解, 在两种共振频率(71.67 Hz 和 140.00 Hz)下, 柱状晶粗化现象明显减弱, 一次晶轴相对较细, 二次晶轴数量增多, 晶间等轴晶增加。当共振频率较大时, 柱状晶晶粒很细, 焊速提高对晶粒大小几乎没有影响。在非共振情况下, 焊

速提高之后, 柱状晶也会变粗, 但粗化情况比未加振动好。

(a) 25-1 号试样($f=0$ Hz, $v=0.025$ m/s)

(b) 25-2 号试样($f=71.67$ Hz, $v=0.025$ m/s) (c) 25-3 号试样($f=88.33$ Hz, $v=0.025$ m/s) (d) 25-4 号试样($f=140.00$ Hz, $v=0.025$ m/s)

图 3 热影响区金相组织

2.2 微观组织

选择图 4 所示位置为目标点，扫描电镜观察，得到焊接接头微观组织如图 5 所示。

图 4 观察位置示意图

(a) 20-1 号试样($f=0$ Hz, $v=0.020$ m/s) (b) 20-2 号试样($f=71.67$ Hz, $v=0.025$ m/s) (c) 20-3 号试样($f=88.33$ Hz, $v=0.025$ m/s) (d) 20-4 号试样($f=140.00$ Hz, $v=0.025$ m/s)

图 5 焊缝区域扫描电镜显微组织

316 不锈钢在进行激光焊接金属重熔后，形成的组织基体与母材组织相同，晶粒间出现大量异于基体的新相，有些为细条状，有些为网格状，在基体相中析出少量细小点状颗粒。对比发现，常规激光焊接后，组织晶粒形状规则，新相在晶界处形成，组织呈网格状，点状颗粒分布于晶界处。施加振动后，形成晶粒细长，新相同样形成于晶界处，网状组织减少，分布弥散；点状颗粒减少，弥散分布在晶界处和晶粒中。晶粒大小和新相形成与振动频率有较大关系，在共振且频率较大时，晶粒更细，新相和点状颗粒形成少且更加弥散。

2.3 显微硬度

显微硬度曲线如图 6 所示，316 不锈钢激光焊接后，焊缝区组织硬度整体高于母材，从母材到焊缝中心呈先上升后稍有下降再上升的趋势，母材平均硬度在 185 HV 左右。常规激光焊接后，接头处平均硬度为 198 HV 左右，较母材区增加 7%；施加振动，焊缝区硬度变化趋势相同，但整体较常规激光焊接高，在较高频率共振时硬度最高。140 Hz 的共

振频率下, 接头平均硬度在 215 HV 左右, 较原始母材组织硬度增加 16.3%。

(a) 20-1 与 20-2 号试样

(b) 20-3 与 20-4 号试样

图 6 显微硬度曲线

3 试验讨论与分析

激光焊接能量密度大, 材料焊后 HAZ 很窄; 冷却速度大, 焊缝与母材间过冷度较大, 会在此区形成细晶组织; 金属凝固, 温度梯度变缓使晶粒以树枝晶形式向焊缝中心生长; 中心处过冷度较小且散热方向不定, 产生一定的等轴晶区。晶粒大小取决于形核率和生长速度, 形核必备条件是相起伏和能量起伏。如图 7、8 所示, 当驱动能增加时, 最大相起伏尺寸 $r_{\max}$ 和高能原子数 n 增加, 高能原子附着在较大尺寸的晶胚上释放能量, 使得晶胚更易达到临界形核尺寸 r_k 而形核。

图 7 驱动能与最大起伏尺寸的关系

图 8 驱动能与高能原子数目的关系

振动焊接过程中, 外部机械振动向熔池输入大量能量, 使原子热运动加剧, 晶核胚芽增加, 形核率上升; 熔池受迫振动, 生长晶粒受液态冲击, 晶粒破碎, 生长线速度下降, 因此晶粒细小。同时, 振动搅拌作用使熔池对流加快, 湍流层宽度增加, 热交换充分, 温度梯度减小, 有利于等轴晶形成。共振情况下, 熔池振动剧烈, 频率较高时, 单位时间内振动次数增加, 外界向熔池输入能量增加, 晶粒更细, 等轴晶更多。振动施加破坏了金属中柱状晶方向一致性, 使柱状晶向不同方向生长, 减小材料焊后力学性能各向异性^[13]。激光焊接本身冷却速度很大, 焊接速度提高会使冷却时温度梯度变缓, 柱状晶粗化。施加振动后, 使温度梯度提升, 粗化现象减弱。晶粒粗化使材料硬脆性上升, 强韧性下降, 整体力学性能下降, 提高焊接速度同时, 配合适当的机械振动, 能在提高生产效率的同时保证焊接质量。

激光焊接的能量密度远高于传统电弧焊接, 被焊母材为奥氏体不锈钢, 在激光焊接时, 焊件温度迅速升高, 基体组织转变为高温铁素体^[14-15](σ)再到液相; 焊后温度下降, 液相生成固相再发生固态相变。由于激光焊接的热输入很高, 能量密度很大, 焊后冷却很快, 使得由于高温形成的 σ 相不会完全转变成奥氏体(γ)而较多的在室温下保存下来, 存在于基体晶间处^[15]。不锈钢中含一定量 C 和合金元素, 焊后部分会生成点状颗粒碳化物(M_xC_y)并向晶间迁移, 存在于晶界处。利用激光作热源焊接奥氏体不锈钢时, 由于热输入很大, 焊后接头组织更易形成高温铁素体和点状碳化物, 并集中分布于晶界处。 σ 是硬脆相, 使不锈钢硬度增加, 强韧性下降, 同时使 γ 不锈钢在强磁场下表现出弱磁性^[13]。碳化物形成使得基体中均匀分布的 Cr 下降, 碳化物向晶界迁移, 出现“贫铬”, 最终导致晶间腐蚀^[16-17]。振动加入后, σ 相仍在晶间形成, 但晶粒生长过程中枝晶破碎, 使 σ 形成更加弥散, 破坏了其网络结构。同时, 振动搅拌加入较少碳化物的偏析, 影响其向

晶界处迁移, 使得部分存在于晶粒中。

材料硬度与其组织晶粒大小有较大关系, 316 不锈钢激光焊接后, 焊缝组织晶粒较细, 整体硬度上升。焊缝与母材间形成细晶组织, 硬度上升; 形成柱状晶后, 由于晶粒增大, 硬度稍有下降; 焊缝中心处, 等轴晶数量较多, 晶粒细小, 硬度升高。施加振动后, 由于外界振动能量和搅拌作用, 焊缝区形成晶粒细小, 柱状晶分枝多, 硬度较高。

4 结论

(1) 316 不锈钢激光焊接后, 焊缝组织呈柱状晶向中心生长, HAZ 较窄。机械振动使形成的柱状晶一次晶轴变细, 二次晶轴数量增加, 晶轴间和焊缝中心区等轴晶数量增加, 在较高共振频率情况下, 这一现象更加明显。焊速的提高会使重熔组织中柱状晶晶枝变粗, 振动可以减弱由于焊速提高而带来的粗化问题。

(2) 316 不锈钢基体组织为奥氏体, 激光焊接后基体晶界处形成较多网状高温铁素体和点状碳化物。机械振动使焊后基体晶界处异于基体的新相和碳化物减少且趋于弥散, 较高共振频率下晶粒更细, 形成的高温铁素体与碳化物更加弥散。

(3) 316 不锈钢激光焊接后, 焊缝组织硬度高于母材, 增加约 7%。机械振动使焊缝组织硬度增加明显, 本试验在 140 Hz 的共振频率下, 硬度增加约 16.3%。

参 考 文 献

- [1] 张德芬, 宋天民, 张国福, 等. 机械振动焊接对残余应力的影响及机理分析[J]. 抚顺石油学院学报, 2001, 21(1): 53-56.
ZHANG Defen, SONG Tianmin, ZHANG Guofu, et al. Mechanical vibration welding on the impact and mechanisms of residual stress analysis[J]. Journal of Fushun Petroleum Institute, 2001, 21(1): 53-56.
- [2] 卢庆华, 饶德林, 朱政强, 等. 振动调制工艺下焊接接头力学性能试验研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(增刊): 219-222.
LU Qinghua, RAO Delin, ZHU Zhengqiang, et al. Experiment study on mechanical properties of welded joint using vibratory conditioning technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(Suppl.): 219-222.
- [3] LU Q H, CHEN L G, NI C Z. Effect of vibratory weld conditioning on welded valve properties[J]. Mechanics of Materials, 2008, 40(7): 565-574.
- [4] JAMES M N, PTERSON A E, SUTCLIFFE N. Constant and variable amplitude loading of 6261 aluminium alloy I-beams with welded cover plates—Influence of weld quality and stress relief[J]. International Journal of Fatigue, 1997, 19(2): 125-133.
- [5] PRSKASH J, TEWARI S P, SRIVASTAVA B K. A review on solidification and change in mechanical properties under vibratory welding condition[J]. International Journal of Engineering Science and Technology, 2010, 2(4): 462-467.
- [6] GOVINDARAO P, SRINIVASARAO P, GOPALAKRISHNA A, et al. Affect of vibratory welding process to improve the mechanical properties of butt welded joints[J]. International Journal of Modern Engineering Research, 2012, 2(4): 2766-2770.
- [7] GOVINDARAO P, SRINIVASARAO P, GOPALAKRISHNA A, et al. Improvement of tensile strength of butt welded joints prepared by vibrator welding process[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2013, 4(4): 53-61.
- [8] MUNSI A S M Y, WADDELL A J, WALKER C A. Vibratory weld conditioning: Treatment of specimens during cooling[J]. Journal of Materials Design and Applications, 2000, 214(3): 129-138.
- [9] MUNSI A S M Y, WADDELL A J, WALKER C A. The effect of vibratory stress on the welding microstructure and residual stress distribution[J]. Strathprints Institutional Repository, 2001, 215(2): 99-111.
- [10] 刘峰. 振动焊接对焊接裂纹影响的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2000.
LIU Feng. Impact of vibration on welding weld crack[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2000.
- [11] 陈金涛, 宫照坤, 曲牡, 等. 振动焊接对焊缝力学性能影响[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(1): 20-27.
CHEN Jintao, GONG Zhaokun, QU Mu, et al. Vibration welding effect on the mechanical properties of the weld[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001, 41(1): 20-27.
- [12] 左铁钊, 陈虹. 21 世纪的绿色制造——激光制造技术及应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 106-110.
ZUO Tiechuan, CHEN Hong. Green manufacture in 21 century—laser manufacturing technology and application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 106-110.
- [13] HUANG H Y, NIE M J, LUAN Y Y, et al. Fatigue

- property of single-crystal and columnar-grained polycrystalline Cu-12wt.%Al alloys[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 27(2012): 1686-1693.
- [14] 居春艳. 两种不锈钢的高温相变及热物理性能的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.
- JU Chunyan. The study on elevated temperature phase transformation and thermal physical properties of two stainless steel[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008.
- [15] YURI T, OGATA T, SAITO M, et al. Effect of welding structure and δ -ferrite on fatigue properties for TIG welded austenitic stainless steels at cryogenic temperatures[J]. *Cryogenics*, 2000, 40(4-5): 251-259.
- [16] 任培东, 潘伟. Cr16Mn9Cu2Ni1N 低镍奥氏体不锈钢凝固组织研究[J]. *特钢技术*, 2013, 19(75): 10-14.
- REN Peidong, PAN Wei. Study on solidification microstructure of Cr16Mn9Cu2Ni1N low nickel austenitic stainless[J]. *Special steel Technology*, 2013, 19(75): 10-14.
- [17] 孙兵, 高林寒, 李小蕴, 等. 316 不锈钢抗晶间腐蚀工艺优化的研究[J]. *热加工工艺*, 2009, 38(16): 38-41.
- SUN Bing, GAO Linhan, LI Xiaoyun, et al. Optimization research of inter-crystalline corrosion-resistant process for 316 stainless steels[J]. *Hot Working Technology*, 2009, 38(16): 38-41.
- [18] 罗宏, 龚敏. 奥氏体不锈钢的晶间腐蚀[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2006, 18(5): 357-360.
- LUO Hong, GONG Min. On intergranular corrosion of austenitic stainless steel[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2006, 18(5): 357-360.
-
- 作者简介: 彭必荣, 男, 1988 年出生。主要研究方向为激光焊接。
E-mail: pengaimay@163.com
- 卢庆华(通信作者), 女, 1978 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。
主要研究方向为激光焊接及能场焊接。
E-mail: auroralu@163.com