

[环保·安全]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.03.020

机械振动对激光填丝焊接接头组织和疲劳性能影响

任新怀, 卢庆华, 白永真

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘要:针对激光填丝焊接过程中存在气孔、飞溅、夹渣和疲劳性能差等缺点,课题组提出了基于机械振动技术的激光填丝焊接方法。课题组采用机械振动与激光填丝焊接相耦合的方法研究了机械振动对焊缝形貌、组织、力学性能和断裂机理的影响。结果表明:机械振动可以改善316不锈钢焊接接头,减少焊缝中的柱状晶,增加树枝晶和等轴晶,提高了焊缝硬度;3种振动频率下焊接接头的残余应力均较高,与振动频率0和524 Hz相比,1 055 Hz振动频率的焊缝残余应力更低;疲劳断口均呈解理断裂,但是与524 Hz振动频率相比,1 055 Hz振动频率具有更低的裂纹扩展率,更好的疲劳性能。

关键词:激光填丝焊;振动频率;316不锈钢;力学性能;断口形貌

中图分类号: TG456.7; TH871.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2020)03-0096-05

Effect of Mechanical Vibration on Microstructure and Fatigue Properties of Laser Filler Wire Welding Joints

REN Xinhui, LU Qinghua, BAI Yongzhen

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings such as pores, splashes, slag inclusions and poor fatigue performance in laser filler wire welding of the ship and automobile industry, a laser filler wire welding method based on mechanical vibration technology was proposed by the research group. The effect of mechanical vibration on weld morphology, microstructure, mechanical properties and fracture mechanism was studied in test by the method of coupling mechanical vibration and laser filler wire welding. The results show that the mechanical vibration can improve the welded joint of 316 stainless steel, reduce the columnar crystal in the weld, increase the dendrites and equiaxed crystals, and improve the hardness of the weld. The residual stress of the welded joints is higher at the three vibration frequencies, compared with the vibration frequencies of 0 and 524 Hz, the residual stress of the weld at 1 055 Hz vibration frequency is the lowest. The fatigue fractures are all cleavage fractures, but the fracture at 1 055 Hz vibration frequency has narrower fatigue striations, lower crack growth rate and better fatigue performance than the 524 Hz vibration frequency.

Keywords: laser filler wire welding; vibration frequency; 316 stainless steel; mechanical properties; fracture morphology

316 不锈钢是一种奥氏体不锈钢,拥有良好的耐磨性和耐腐蚀性,便于冲压和焊接,已广泛应用于工业领域。在实际应用中,316 不锈钢构件的连接常采用焊接方法。激光焊接以热输入集中、焊缝窄、制造灵活、生产效率高且易于自动化等优点常被采用。但由于焊接热循环和材料成分等差异,相较于母材,焊缝凝固组织中缺陷(如气孔、夹渣等)和大量的元素偏析,

是导致焊接接头力学性能下降的原因^[1-3]。同样由于激光高热量输入,试样中会产生比较高的残余应力,导致材料的使用寿命降低。在激光焊接过程中施加机械振动在有色金属领域应用较多,并已有研究表明通过施加振动可以减少焊接接头的缺陷和残余应力^[4-5]。然而机械振动在激光填丝焊接领域应用较少,其工艺优化和理论体系尚不完善,有待进一步研究。课题组在

收稿日期:2019-11-02;修回日期:2020-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51605276)。

第一作者简介:任新怀(1993),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向为激光焊接技术。E-mail: r804190383@163.com

激光填丝焊接 316 不锈钢过程中施加了机械振动,研究机械振动参数对焊缝形貌、组织、力学性能和断裂机理的影响规律,有助于今后 316 不锈钢在工程中的应用。

1 实验方法

实验所采用的焊接材料是尺寸为 $150.0\text{ mm} \times 100.0\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$ 的 316 不锈钢,焊丝材料是直径为 1.2 mm 的 ER316L 不锈钢焊丝。316 不锈钢和 ER316L 焊丝的化学成分如表 1 所示。

表 1 316 不锈钢和 ER316L 焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of 316 stainless steel and ER316L welding wire %

材料	C	Si	Mn	P
316	≤ 0.080	≤ 1.000	≤ 2.000	≤ 0.035
ER316L	0.030	0.600	1.800	0.015
材料	S	Ni	Cr	Mo
316	≤ 0.030	10.000 ~ 14.000	16.000 ~ 18.500	2.000 ~ 3.000
ER316L	0.008	12.000	18.000	2.300

激光填丝焊接实验采用的是 IPG-5000 型号 5 kW 光纤激光加工系统,其以垂直入射的方式进行焊接。在焊接之前,焊接试样被夹在自主设计的振动平台上。振动平台包括激励线圈、函数发生器、音频功放器和夹持试样的控制台。在焊接实验过程中,先对 316 不锈钢进行无振动焊接,通过对焊接接头表面形貌的观察选择一组最佳的焊接参数(激光功率 4 000 W,焊接速度 0.02 m/s ,离焦量 -10 mm ,送丝速度 250 mm/min ,送丝角度为 45° ,Ar 保护气流量 25 L/min)。确定激光焊接参数后,再进行振动焊接,通过微振动加速度计测得 316 不锈钢的 2 组共振频率分别为 524 和 1 055 Hz。振动辅助激光填丝焊接实验参数如表 2 所示。

表 2 振动焊接参数

Table 2 Vibration welding parameters

样品 编号	振动频 率/Hz	振动加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	样品 编号	振动频 率/Hz	振动加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
1	0	0	4	524	17.7
2	0	0	5	1 055	65.4
3	524	17.6	6	1 055	65.6

焊接实验完成后,通过标准工序制备金相试样,试样经研磨和抛光后,用王水腐蚀 $8 \sim 10\text{ s}$ 。腐蚀后的金相试样通过 VHX-6000 型超景深显微镜观察。用 HX-1000 显微硬度计测量焊接接头横截面的显微硬度,相邻测量点间隔 0.2 mm 。通过盲孔法对焊缝中心进行残余应力测试,分析机械振动对激光填丝焊接 316 不锈钢残余应力的影响。疲劳试样是直接从相同参数的

焊缝中切得,尺寸如图 1 所示。疲劳测试前将所有的疲劳试样表面抛光,避免表面划痕对其影响。所有疲劳实验采用的应力比为 0.1(最小应力与最大应力的比值),疲劳测试的循环次数设为 10^7 。疲劳试样断口通过 SEM 观察,以揭示疲劳萌生和断裂的机理。

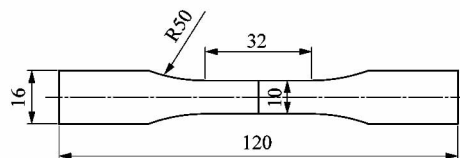


图 1 疲劳试样尺寸

Figure 1 Size of fatigue sample

2 实验结果与分析

2.1 焊缝表面形貌与显微组织分析

在不同的振动频率下,激光填丝焊接接头背面形貌如图 2 所示。从图 2 中可以看出,在无振动下焊接,焊缝背面熔池较窄,有少许的飞溅,并且熔池驼峰分布不均匀,大小不一。在振动频率为 524 Hz 下,焊缝熔池几乎无飞溅,熔池驼峰分布均匀,大小基本一致,但是不连续。在驼峰处的焊缝宽度大于无振动下的熔池宽度。在振动频率 1 055 Hz 下,焊缝背面成型最好,无驼峰和飞溅,相较于前 2 种焊接,此时的焊缝背面熔池最宽。这是因为机械振动对熔池起搅拌的作用,熔池流动加快,使激光能量更加均匀地分布在熔池中,避免了激光束能量不稳定带来的焊缝成型缺陷^[6]。

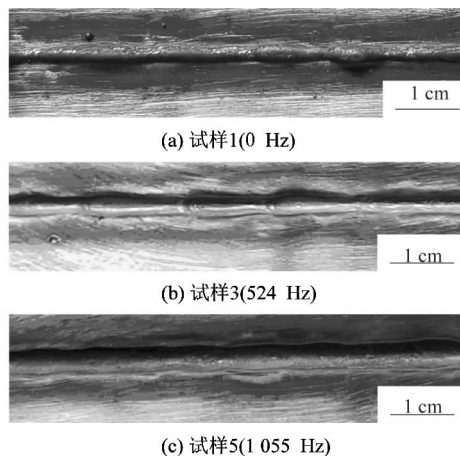


图 2 不同振动频率对焊缝背面形貌的影响

Figure 2 Effect of different vibration frequencies on back surface morphology of weld

对不同振动频率下的焊缝宽度进行测试,结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出焊缝宽度随着振动频率增加而减小。从图 2 中焊缝背面熔池宽度也印证了这

一点。这是因为在激光焊接过程中,施加的机械振动加剧了对熔池的搅拌^[7],熔池内部流动加速,激光能量随着熔池流动向下传递,在熔池流动和热传导的相互激励作用下,熔池底部(即焊缝背面)聚集了更多的热量,所以焊缝上表面宽度逐渐变窄,焊缝背面变宽。

图4所示为不同机械振动频率下316不锈钢焊接接头纵截面的金相显微组织。从图4中可以看出,焊缝都有明显的熔合线和热影响区较窄的特点,并且液态熔池凝固方向近乎垂直于熔合线。母材呈明显的奥氏体晶粒。对于未施加机械振动的试样,焊缝区金相组织在明显的凝固结晶方向存在大量的柱状晶和树枝晶,等轴晶较少;当施加机械振动时,如图4(b)和(c)所示,随着振动频率的增加,焊缝中柱状晶和树枝晶逐渐减少,等轴晶逐渐增加。这是因为在焊接过程中,机械振动加剧了焊缝液态熔池流动,即液态熔池冲刷力

的增大加剧了柱状晶破碎的倾向性,部分柱状晶断裂形成树枝晶和等轴晶,离散分布在柱状晶之间。

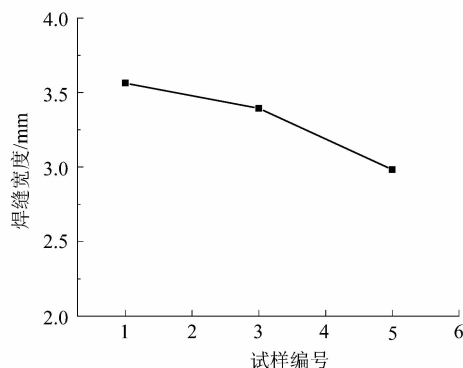


图3 不同振动频率对焊缝上表面宽度的影响

Figure 3 Effect of different vibration frequencies on width of upper surface of weld

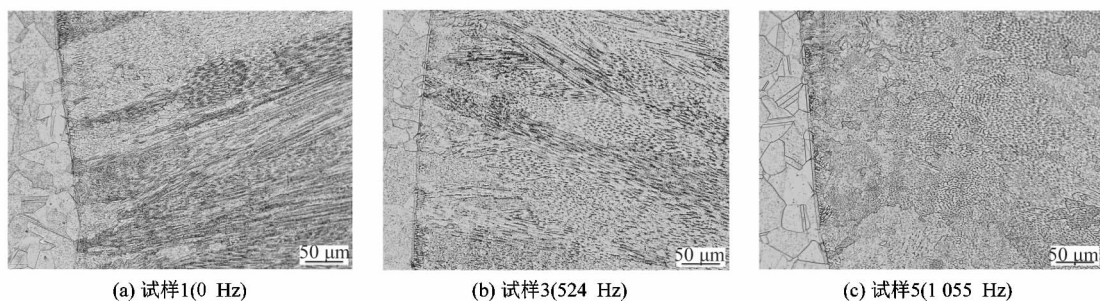


图4 不同振动频率对焊缝纵截面显微组织影响

Figure 4 Effect of different vibration frequencies on microstructure of longitudinal section of weld

2.2 焊缝残余应力与硬度分析

图5所示为通过盲孔法测得的不同振动频率下316不锈钢焊缝中心的残余应力图。从图5中可以看出激光填丝焊接后,焊缝均出现较大的残余应力。这是因为在激光焊接过程中,焊缝中聚集了大量的能量,在冷却收缩时,产出比较高的残余应力^[8]。相比较于无振动焊接,振动频率为524 Hz时焊缝的残余应力增加了16%;振动频率为1 055 Hz时焊缝的残余应力降低了8%。机械振动属于二自由系统,具有2种模态,根据固有频率分为1阶模态和2阶模式。1阶模态是外力的激励频率等于物体的固有频率;2阶模态是外力的激励频率是物体固有频率的2倍。振动频率524 Hz是属于1阶模态,焊缝背面出现有规律的驼峰(图2),说明524 Hz振动频率虽然加速了熔池流动和热传导,但不足以使热量快速传递到焊缝熔池底部,使热量聚集在熔池中心,产生比较高的残余应力。振动频率1 055 Hz属于2阶模态,其加剧了熔池流动和热传导,

足以使焊缝内部快速散热,变形小,残余应力减小。

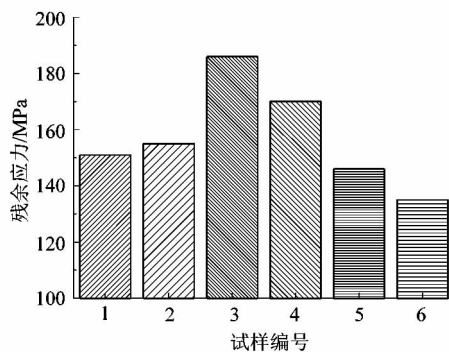


图5 不同振动频率对焊缝中心残余应力的影响

Figure 5 Effect of different vibration frequencies on residual stress in weld center

图6所示为不同振动频率下焊缝横截面的显微硬度。从图6中可以看出316不锈钢焊缝处的显微硬度增大。3种振动频率下的焊缝显微硬度不同,相较于母材分别提高了6.7%、8.7%和11.4%。焊缝处的显

微硬度,跟焊缝中的晶粒大小和形状有关,晶粒越小,形状越均匀,硬度越高。从图4可知,随着振动频率的提高,柱状晶减少,枝晶和等轴晶增加,从而使焊缝硬度提高。在图6中可以看出,振动频率为1 055 Hz时对焊缝的硬度提升比较明显。

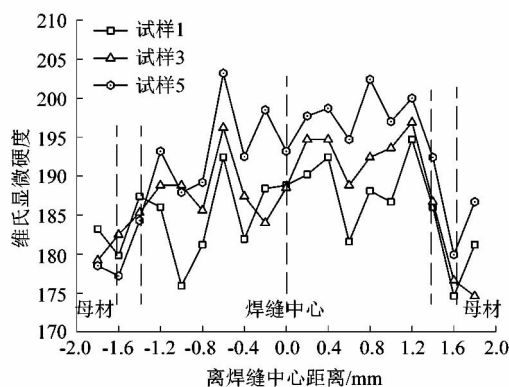


图6 不同振动频率对焊缝显微硬度的影响

Figure 6 Effect of different vibration frequencies on micro-hardness of weld cross section

2.3 疲劳断裂分析

对不同振动频率下的焊接试样进行疲劳测试,断口采用SEM观察,如图7所示。疲劳断口主要由疲劳源、疲劳扩展区和疲劳瞬断区组成。疲劳寿命主要由疲劳裂纹萌生的时间决定^[9]。从图7(a)可以看出,无振动焊接焊缝中容易存在气孔等缺陷,疲劳试验时应力会在气孔处集中,裂纹更加容易萌生,形成裂纹源。机械振动有利于减少气孔等缺陷^[10],在振动频率为524 Hz时,疲劳断裂沿着主裂纹扩展,主裂纹扩展过程中,两边出现二次裂纹和撕裂棱,且在裂纹扩展区中出现晶间裂纹和河流花样,这是解理断裂的主要特征。在振动频率为1 055 Hz时,裂纹扩展区也出现有二次裂纹,但在裂纹扩展过后部分裂纹发生愈合。从图7(e)和(f)可以看出:振动频率为524和1 055 Hz时瞬断区都出现有疲劳辉纹,每一条疲劳辉纹对应一次加载,疲劳辉纹间距与疲劳裂纹扩展速率有关^[11];间距越窄说明裂纹扩展速率越慢,从图中可以看出,在1 055 Hz振动频率下,疲劳性能最好。

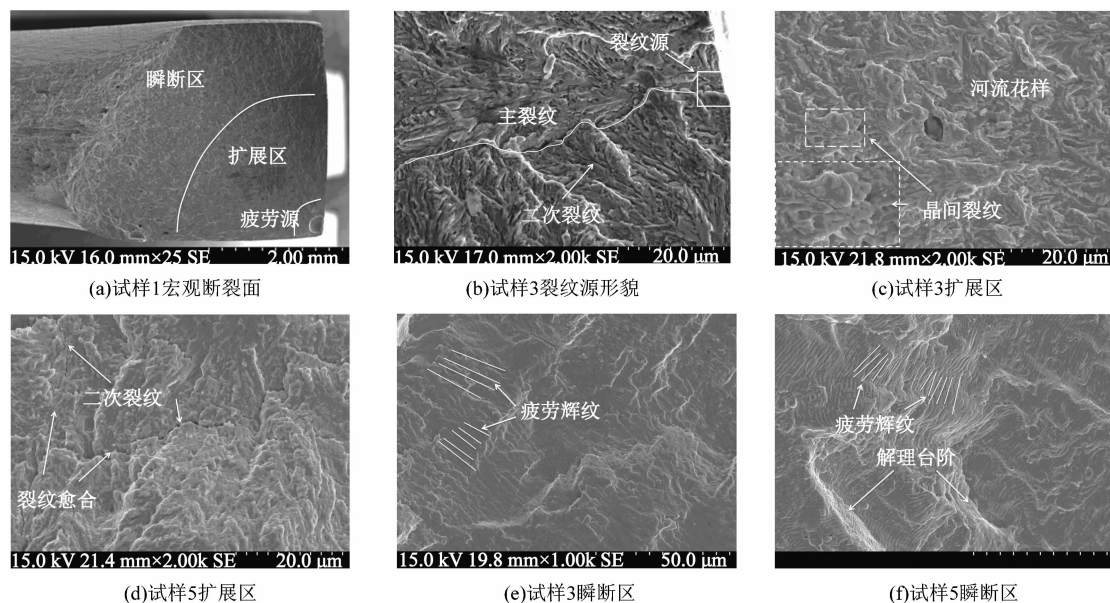


图7 不同振动频率下的断口形貌

Figure 7 Fracture morphology at different vibration frequencies

3 结论

1) 在振动频率分别为0,524和1 055 Hz下进行的激光填丝焊接316不锈钢接头中,1 055 Hz的成型更好,焊缝更加均匀;焊缝上表面宽度随着振动频率的增加而降低,焊缝背面宽度则随之增加;机械振动可以细化焊缝中的柱状晶,增加树枝晶和等轴晶。

2) 激光填丝焊接接头存在较高的残余应力,相较于0和524 Hz振动频率,1 055 Hz振动频率下的焊缝残余应力最低;3种振动频率下的焊缝横截面的显微硬度随着振动频率的增加而增加,相较于母材分别提高了6.7%,8.7%和11.4%。

(下转第104页)