

1060Al 高频微振激光焊接接头气孔及组织

蔡遵武, 卢庆华, 张成, 张巍

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘 要: 采用激光和高频微振相耦合的方法焊接 5 mm 厚的 1060Al, 研究振动对焊缝成形、气孔尺寸、数量和分布、显微组织及显微硬度的影响规律, 并研究了熔池的流动状态对气孔位置分布的影响. 结果表明, 当其它激光工艺参数一定, 振动频率为 1 173 Hz 时, 组织晶粒细化最为明显, 焊缝宏观成形较好, 焊接接头可获得最佳表面外观, 焊缝中心平均显微硬度从无振动条件下的 27.2 HV 增加到有振动条件下的 29.4 HV, 提高 8.1%. 振动频率为 923 Hz 时, 气孔能够有效地得到抑制. 振动影响熔池的流动与激光匙孔的稳定性, 与焊缝气孔形成具有一定的相关性, 表现在气孔逐渐向焊缝表面逸出.

关键词: 激光; 高频微振; 气孔; 显微组织; 显微硬度

中图分类号: TG 456.7

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2019400011

0 序 言

振动焊接是在常规焊接过程中给焊件施加周期性的外力, 使焊件随振随焊, 达到降低焊接残余应力、改善焊接接头成形、优化接头组织、细化晶粒等目的, 进而提高焊接接头性能的一种焊接方法^[1-5]. 目前, 国内外对机械振动焊接的研究主要集中于传统弧焊方法. 在国外, Mostafapour 等人^[6]研究了机械振动下 2 mm 厚 304 不锈钢 MIG 焊焊接接头性能, 分析发现接头抗拉强度较无振动条件下提高了 54.16%. Kimb 等人^[7]研究发现在焊接过程中施加振动可以起到细化晶粒的作用, 有振动较无振动情况下晶粒尺寸下降了 32%. Govindarao 等人^[8-9]研究得出手工电弧焊振动焊接使接头抗拉强度从 530 MPa 增加到 651 MPa. 在国内, 孟强等人^[10]研究发现 6061-T6 铝合金在机械振动条件下, 焊缝区和热影响区的晶粒得到细化, 晶粒尺寸从无振动时 45.6 μm 下降到 24.8 μm , 焊接接头的抗拉强度提高了 10%, 焊缝区的显微硬度提升了 15%. 温彤等人^[11]研究了高频振动对 AZ31 镁合金 TIG 焊焊接接头显微组织和力学性能研究, 发现振动频率为 15 kHz 时, 晶粒尺寸明显减小, 从 49.4 μm (无振动) 下降到 27.3 ~ 34 μm (有振动), 另外焊缝区的

显微硬度、接头的整体抗拉强度和显微硬度提高.

近年来, 激光焊接以其能量密度高、焊接速度快、热影响区窄、深宽比大等优势^[11-13], 在焊接领域中备受青睐, 但激光焊接焊后冷却速度快, 熔池内温度梯度大, 以柱状晶的形式向焊缝中心生长, 如在激光焊接过程中施加恰当的机械振动, 有望打断柱状晶生长, 细化晶粒. 彭必荣等人^[14]研究了机械振动对 316 不锈钢激光焊接接头组织的影响, 发现提高焊接速度后, 振动的加入能够细化焊缝区出现的粗大柱状晶, 振动焊接下得到的焊缝区接头显微硬度较高, 且较高共振频率下硬度增加明显, 证实了机械振动辅助激光焊接工艺的可行性. 然而目前相关研究尚且不多, 基础研究工作仍有不足.

随轻量化概念的普及, 铝及铝合金焊接的研究成为新热点. 施加机械振动, 促使熔池结晶时气体向外逸出, 可减小铝及铝合金焊缝气孔量. 文中将高频微振和激光相耦合进行焊接, 研究了不同振动频率工艺参数对 1060Al 高频振动激光焊接接头成形、显微组织和显微硬度的影响, 尤其针对铝及铝合金激光焊接最常见的气孔问题进行了重点探讨, 并得出较优良的高频微振激光焊接工艺, 为振动技术在高能束焊接领域的科学研究和工程应用提供试验依据.

1 试验方法

试验选取纯度 99.6% 的工业纯铝 1060Al, 其目的为在排除合金元素对熔池凝固过程干扰的基

基础上,深化高频微振工艺对组织和性能影响机理的认识.待焊试板规格为 $200\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 5\text{ mm}$.

1.1 试验过程

焊接之前,用砂纸打磨试样表面,去除致密的氧化物和污渍,然后用酒精擦拭除去杂质.振动平台为自行研制的基于电磁式激振器的高频振动激光焊接工艺平台,如图 1 所示.焊接前将试样刚性固定在高频微振平台上以保证振动能量的有效传播.采用 IPG YLS-5000 型高功率光纤激光器,最大功率 5 000 W,最小聚焦光斑直径 0.3 mm,焦距 310 mm.采用侧吹氩气保护,气体流量为 20 L/min.焊接过程不填充材料.试验中保持激光功率为 4 500 W,

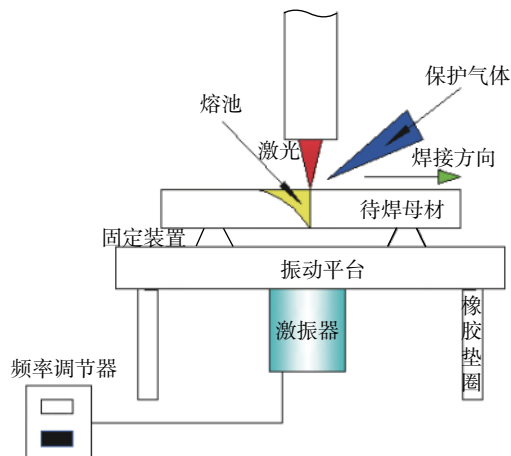


图 1 高频微振激光焊接平台示意图

Fig. 1 Schematic installation diagram of high frequency laser micro vibration control platform

离焦量为 -15 mm 不变^[15],其它工艺参数见表 1.

表 1 激光焊接工艺参数

Table 1 Processing parameters of laser welding

试样编号	焊接速度 $v/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	振动频率 f/Hz	振动加速度 $a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
Al1	1.2	0	0
Al2	1.2	505	48.6
Al3	1.2	923	48.6
Al4	1.2	1173	48.6
Al5	1.2	1322	48.6

选取焊接接头横截面制备金相试样.腐蚀液由 190 mL 的水、5 mL 硝酸、3 mL 的盐酸和 2 mL 的氢氟酸配制而成.利用 VHX-600K 型超景深数码光学显微镜观察接头成形和金相组织.利用 HXD-1000TMSC/LCD 型显微硬度计测量接头显微硬度,载荷为 0.098 N,加载时间为 15 s,测量时硬度测量线垂直于焊缝中心线,相邻测点间隔为 0.1 mm,测点连线距母材上表面 0.2 mm.

2 试验结果与分析

2.1 接头表面成形分析

不同振动频率下接头表面成形见图 2.观察发现,在其它激光焊接工艺参数一定时,随着振动频率提高,焊缝表面成形更加美观,但振动频率不能超出某一临界值.当频率为 0 Hz(无振动)时,焊缝

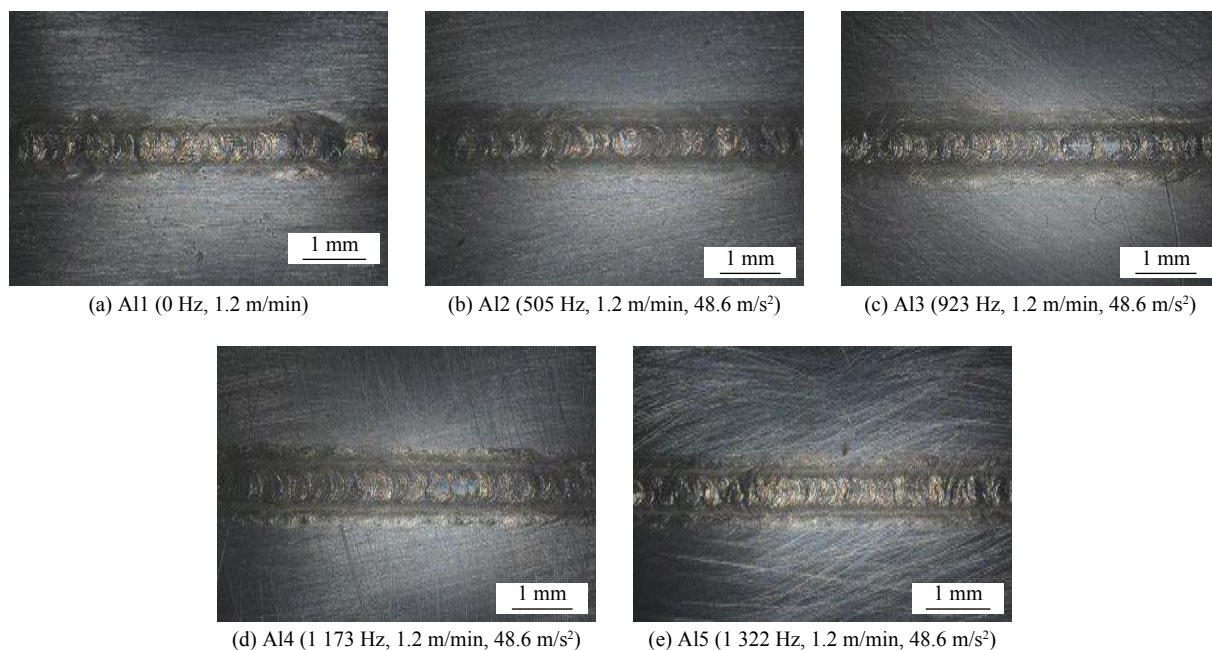


图 2 不同振动频率工艺接头表面成形

Fig. 2 Typical weld morphology with processing parameters of laser welding

不连续, 表面粗糙, 出现局部塌陷, 成形较差; 当振动频率为 505 Hz 时, 焊缝整体较连续, 但存在局部波纹分布不均现象; 当振动频率为 923 Hz 时, 焊缝整体表面成形较好; 当频率提高至 1 173 Hz 时, 焊缝连续饱满, 波纹较为均匀, 未出现塌陷等缺陷; 但当频率高达 1 322 Hz 时, 焊缝不连续, 出现了部分坍塌, 飞溅等缺陷。

2.2 接头气孔分析

图 3 为无振动 (0 Hz) 条件下的 1060Al 焊缝中心典型的气孔形貌图。其中, 气孔尺寸较小、形状呈较规则的圆形气孔为氢气孔, 而形状不规则呈椭圆形的则为工艺性气孔。激光焊接 1060Al 铝产生氢气孔主要与气泡的逃逸速率和结晶速率有关。一是由于铝在液态时能大量地吸收和溶解氢, 由于氢在液态和固态铝中的溶解度不同, 从而产生的氢溶入过热的激光焊接熔池中冷却结晶过程析出气泡; 二是由于铝的导热系数很大, 在相同的焊接工艺情况下, 其冷却速度是钢的 4~7 倍, 使得金属结晶加快, 激光焊接熔池在快速冷却过程中, 氢的溶解度急剧下降, 此时析出大量过饱和气体, 氢气来不及析出, 在焊缝金属中形成气孔^[16]。

图 4 和图 5 分别为不同振动情况下焊缝横截面中气孔的分布与振动频率对气孔数量影响图。由

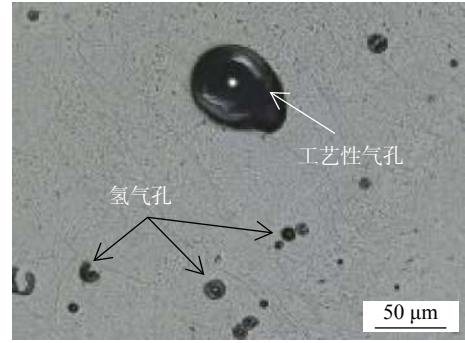


图 3 焊缝中心的典型气孔形貌 (无振动)

Fig. 3 Porosity morphology in welded center (without vibration)

图可见, 气孔数量随着振动频率增加呈现先减少后增加趋势。当无振动条件时 (图 4a), 焊接接头出现了数量多、形状大小各不相同的气孔, 且气孔主要聚集在近焊缝上表面, 分析认为, 无振动焊接条件下, 熔池的运动状态相对比较单一, 气体较难快速逸出; 当振动频率为 505 Hz 时 (图 4b), 焊缝气孔的数量有所减少, 形状仍大小不均, 但气孔上浮的趋势越来越显著, 其尺寸大约在 0.01~0.02 mm 之间; 当振动频率为 923 Hz 时 (图 4c), 仅在截面上观察到 1 个气孔, 且气孔上浮趋势更加显著, 这是因为在激光焊接过程中施加的周期性振动增加了液态金属对固液界面的冲刷, 靠近匙孔壁面的液态金

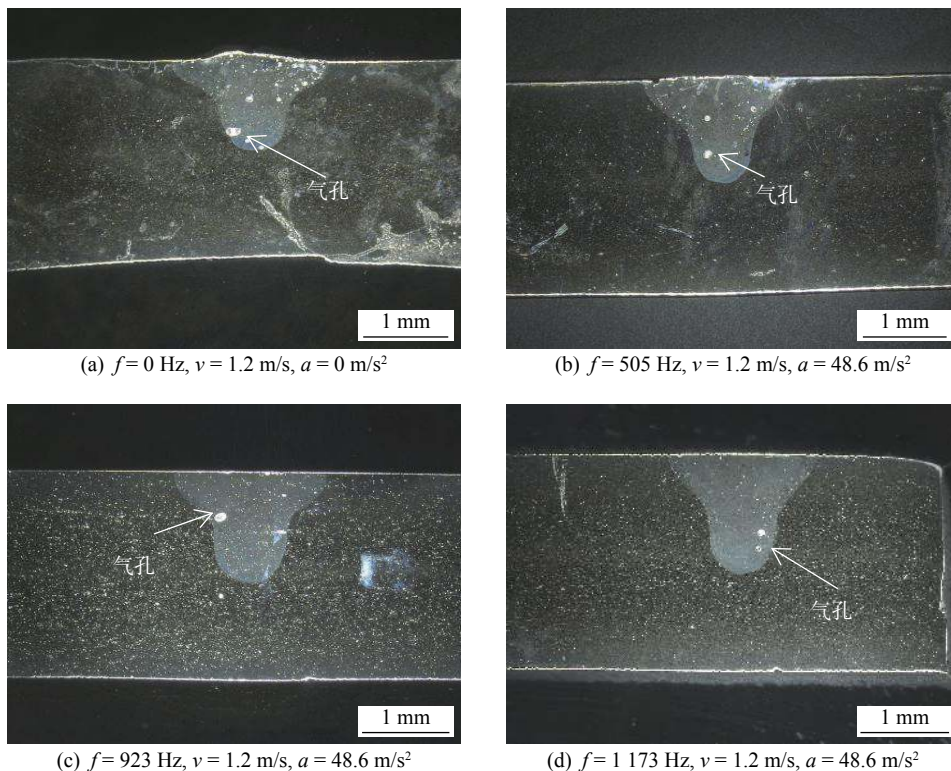


图 4 不同振动情况下的焊缝横截面气孔的分布

Fig. 4 Pores distribution in welded joints under different vibration conditions

属流动方向均向上,其产生的强烈摩擦作用使气体容易脱离出来,同时,随着振动频率变大,受迫振动的熔池凝固表面的氧化膜可以充分破碎净化,向上运动的金属液体能带动气孔快速从熔池表面逸出;当振动频率高达 1 173 Hz 时 (图 4d),气孔数量反而有所增加,分析认为,过大的振动频率使受迫振动的液态熔池产生了过大的扰动,激光匙孔的不稳定性加剧,靠近匙孔底部位置,熔池内部金属的急剧运动形成强烈的漩涡,极易产生气泡,靠近匙孔底部后沿金属气泡不能及时逸出,气泡聚集并最终形成气孔缺陷。

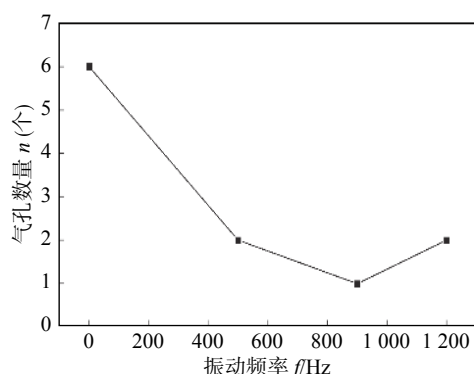


图5 振动对气孔数量的影响

Fig. 5 Influence of vibration on pore amounts

由图 4 仍可发现,焊接过程中伴随振动的施加,焊缝中的气孔有逐渐向焊缝边缘与焊缝表面逸出、且近焊缝表面气孔逐渐减少的总体趋势.焊缝表面气孔减少主要是由于稳定施加机械微振会引起激光对熔池产生周期性的压缩,等同于对熔池表面施加了一个周期性的激振力 (图 6),并加速熔池液体金属的流动,有利于在熔池冷却过程中热量交换充分进行,降低熔池温度梯度,有利于气泡向表面逸出。

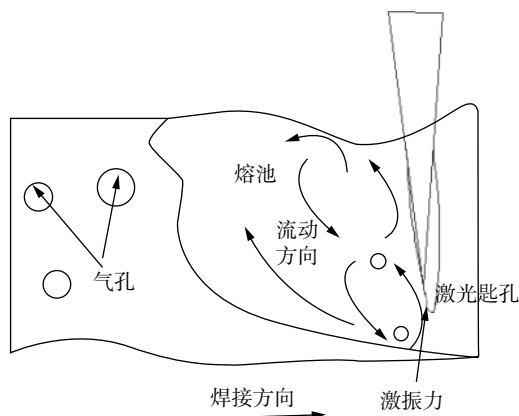


图6 振动对熔池流动及气孔的影响

Fig. 6 Influence of vibration on molten flow and pore

2.3 接头显微组织分析

1060Al 激光焊接接头母材、热影响区、焊缝区显微组织如图 7 所示.由图 7 可知,激光焊接头各区域组织差异较大,焊缝区晶粒呈现等轴晶结构,热影响区为较粗大的柱状晶。

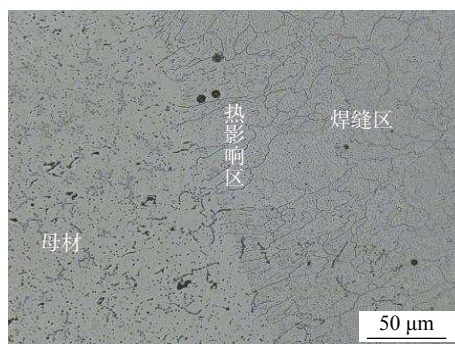


图7 激光焊接接头显微组织

Fig. 7 Microstructures of laser welded joint

图 8 为不同振动频率下焊缝区金相组织;图 9 为不同振动频率下的焊缝区平均晶粒尺寸.可以看出,未施加振动时,组织晶粒形状不规则且晶粒粗大,平均晶粒尺寸为 60 μm ,施加振动时,晶粒形状规则,晶粒细化,且随着振动频率的增大,熔池晶粒细化越来越明显,且振动频率为 1 173 Hz 时,平均晶粒尺寸为 25 μm ,相较于无振动时平均晶粒尺寸减少了 58.3%.这是由于加入机械振动后,柱状晶生长时晶粒能够被打断,且随着振动频率增加,振动对熔池晶粒生长的影响所起作用更加明显.施加振动导致柱状晶的生长受到阻碍,被破碎的枝晶在液态熔池中独立长大形成新的晶粒;焊缝区也随着振动频率的增加表现为非常细小的等轴晶粒.另一方面是由于单位体积晶粒数量由凝固过程中的形核率 N 与生长速率 R 比值决定^[17].施加振动对熔池产生作用,加速相起伏与能量起伏,增加形核率,生长速率与温度有关,与振动无关, N/R 比值增大,晶粒数目增多,晶粒得到进一步细化.由此说明晶粒的大小与振动频率有较大的关系,振动频率高达 1 173 Hz 时,振动对焊缝晶粒均匀、细化作用最为明显。

2.4 接头显微硬度分析

图 10 为焊接速度为 1.2 m/min 时,不同振动频率下的焊接接头显微硬度分布曲线.可以看出,接头硬度沿焊缝中心呈对称分布,从母材到焊缝中心硬度逐渐提升,其峰值出现在焊缝区.母材平均硬度值为 25.2 HV,而焊缝平均硬度值达到 28.5 HV,显微硬度较母材提高了 13.1%.振动频率从 505 Hz

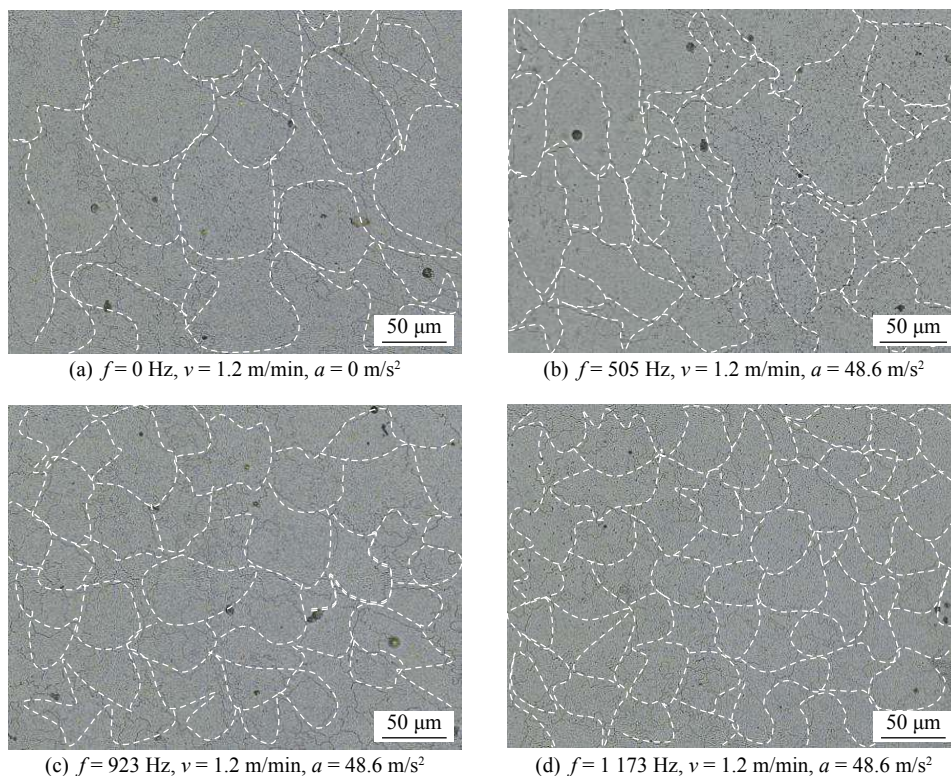


图 8 不同振动频率 1060Al 焊缝区显微组织形貌

Fig. 8 Microstructure of 1060 Al weld zone with different vibration frequency

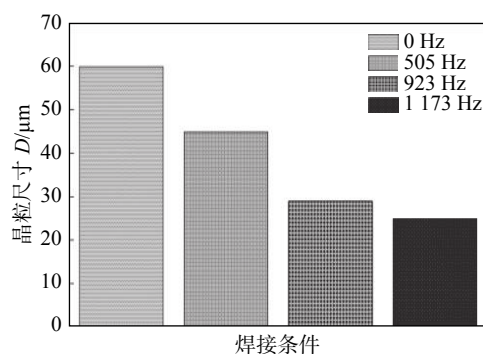


图 9 不同振动频率下的 1060Al 焊缝区平均晶粒尺寸

Fig. 9 Average grain size of 1060Al weld zone under different vibration frequencies

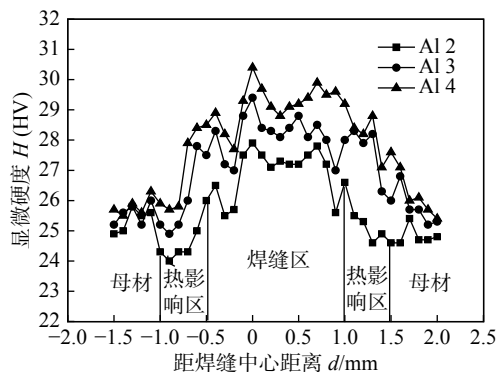


图 10 不同振动频率 1060Al 激光焊接接头的显微硬度分布

Fig. 10 Microhardness distribution of 1060Al laser welding joint under different vibration frequency

增加到 1 173 Hz, 焊缝中心显微硬度从 27.8 HV 提高到 29.3 HV. 材料硬度与其组织晶粒大小有较大关系, 1060Al 通过机械振动和激光焊接相耦合后, 其焊缝组织较细, 整体硬度上升. 施加振动后, 由于外界振动能量和搅拌作用, 使柱状晶生长时晶粒能够被打断, 起到细晶强化的作用, 焊接接头的显微硬度提高.

3 结 论

(1) 随着振动频率的提高, 焊缝表面成形更加美观, 但振动频率不能超出某一临界值. 当频率为 1 173 Hz 时, 焊缝连续饱满, 波纹较为均匀, 未出现塌陷等缺陷.

(2) 1060Al 激光焊接过程中存在着氢气孔和工艺性气孔, 施加机械振动气孔逐渐向焊缝边缘及表面逸出且能够有效减少气孔, 气孔的减少随着振动频率的增加先降后升, 振动频率不宜过大否则会促进气孔增多.

(3) 对比有无振动条件, 发现焊缝区的晶粒随着振动频率的增加, 能够使晶粒更细, 且在振动频率为 1 173 Hz 时, 晶粒细化最为明显, 相较于无振

动时平均晶粒尺寸减少了 58.3%。

(4) 1060Al 通过高频微振和常规激光焊接相结合后, 焊接接头的显微硬度由母材到焊缝中心逐渐增加, 增加约 13.1%。机械振动使焊缝组织硬度增加明显, 在 1 173 Hz 的共振频率下, 硬度增加约 8.1%。

参考文献:

- [1] 卢庆华, 陈立功, 于治水. 基于内耗的振动焊接焊缝力学分析 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 97 – 100.
- Lu Qinghua, Chen Ligong, Yu Zhishui. Mechanical analysis of vibration welding seam based on internal friction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(20): 97 – 100.
- [2] Lu Q H, Chen L G, Ni C Z. Improving welded valve quality by vibratory weld conditioning[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 457(1-2): 246 – 253.
- [3] Tsai T C, Chou C C, Tsai D M, *et al.* Modeling and analyzing the effects of heat treatment on the characteristics of magnesium alloy joint welded by the tungsten-arc inert gas welding[J]. Materials and Design, 2011, 32(8-9): 4187 – 4194.
- [4] Puga H, Costa S, Barbosa J, *et al.* Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi9Cu3 alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11): 1729 – 1735.
- [5] 苏允海, 马大海, 林金梁, 等. 高强钢振动焊接工艺参数的优化 [J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 105 – 108.
- Su Yunhai, Ma Dahai, Lin Jinliang, *et al.* Optimization of vibration welding parameters for high strength steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(7): 105 – 108.
- [6] Mostafapour A, Gholizadeh V. Experimental investigation of the effect of vibration on mechanical properties of 304 stainless steel welded parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70: 1113 – 1124.
- [7] Kimb J, Sony R, Yunj O, *et al.* Residual stress relief and redistribution of welded metals by vibratory stress relaxation[J]. Materials Science Forum, 2008, 580: 419 – 423.
- [8] Govindarao P, Srinivasarao P, Gopalakrishna A, *et al.* Improvement of tensile strength of butt welded joints prepared by vibratory process[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Technology(IJMET), 2013, 4(4): 53 – 61.
- [9] Govindarao P, Srinivasarao P, Gopalakrishna A, *et al.* Effect of vibratory process to improve the mechanical properties of butt welded joints[J]. International Journal of Modern Engineering Research, 2012, 2(4): 2766 – 2770.
- [10] 孟 强, 王怡高, 刘小超, 等. 6061-T6 铝合金板超声振动强化搅拌摩擦焊接头组织与性能 [J]. 焊接学报, 2015, 36(4): 49 – 53.
- Meng Qiang, Wang Yigao, Liu Xiaochao, *et al.* Microstructure and properties of 6061-T6 aluminum alloy plate reinforced by ultrasonic vibration enhanced friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(4): 49 – 53.
- [11] Tong W, Liu S, Chen S. Influence of high frequency vibration on microstructure and mechanical properties of TIG welding joints of AZ31 magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(2): 397 – 404.
- [12] 龚玉兵, 王善林, 陈玉华, 等. FeSiB 非晶薄带激光焊缝成形及接头力学性能 [J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303001.
- Gong Yubing, Wang Shanlin, Chen Yuhua. Weld formation and mechanical properties of FeSiB amorphous ribbons in laser welding[J]. Chinese Journal of Laser, 2016, 43(3): 0303001.
- [13] AKuryntsev S V, Gilmutdinov A K. Welding of stainless steel using defocused laser beam[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114: 305 – 313.
- [14] 彭必荣, 卢庆华, 何晓峰, 等. 机械振动对激光焊接接头组织的影响 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(20): 94 – 100.
- Peng Birong, Lu Qinghua, He Xiaofeng, *et al.* Effect of mechanical vibration on microstructure of laser welded joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 94 – 100.
- [15] 卢庆华. 振动对焊接接头组织与性能的影响及其工程应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [16] 姚良均, 李震夏, 武 恭, 等. 铝及铝合金材料手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [17] Ray C S, Fang X, Day D E. New method for determining the nucleation and crystal-growth rates in glasses[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 83(4): 865 – 872.

第一作者简介: 蔡遵武, 男, 1991 年出生, 硕士研究生. 主要从事激光焊接方向研究. Email: Caizwu@163.com

通信作者简介: 卢庆华, 女, 博士, 副教授, 研究生导师. Email: auroralu@163.com