DOI: 10.3901/JME.2018.02.034

激光熔丝增材制造丝材过渡状态的 电磁振动监测方法^{*}

黄安国 刘 博 郑增超 郭嘉琪 陈一元 庞盛永
(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室 武汉 430074)

摘要: 提出一种在线监测激光熔丝增材制造中微细丝材(1~2 mm)过渡状态的电磁振动监测方法, 建立监测系统的数学模型并研制原型装置。通过设计试验, 采用磁性以及非磁性微细丝材对监测系统的振动发生、信号采集等功能进行测试与验证, 发现可获得强度显著大于环境噪声的稳定振动信号, 证实了监测方法的可行性。基于该装置, 开展了激光熔丝增材制造工艺中丝材过渡状态的监测试验研究。结果表明: 滴状过渡时, 成形中, 基板接收到的振动信号低于环境噪声强度(约为-70 dB); 而液桥过渡时, 可获得清晰的振动信号(强度-67~-62 dB), 高于环境噪声强度。综上, 采用所研制的原型装置可清晰分辨滴状过渡与液桥过渡这两种典型的丝材过渡状态, 能对激光熔丝增材制造工艺的丝材过渡状态进行有效监测。

关键词: 激光熔丝增材制造; 电磁振动监测方法; 振动信号; 丝材过渡状态

中图分类号: TB54

Electromagnetic Vibration Monitoring Method for Liquid Transfer Mode in Wire Feeding Based Laser Additive Manufacturing(WFLAM)

HUANG Anguo LIU Bo ZHENG Zengchao GUO Jiaqi CHEN Yiyuan PANG Shengyong
(State Key Laboratory of Material Processing and Die&Mould Technology,
Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract: An electromagnetic vibration (EMV) method is proposed to monitor the molten drop transition form of the fusing wire (1-2 mm) during Laser Additive Manufacturing (LAM). The theoretic and mathematical model of monitoring system is established and the new prototype device is developed. Two different kinds of wire (magnetic and nonmagnetic fine welding wires) are respectively utilized to test and verify the ability of the vibration excitation and signal collection of the monitoring system. The experimental results show that the proposed EMV method is available. Based on the developed device, the relations is investigated between the molten drop transition form of fusing wire and the strength difference of the vibration excitation signal and environmental noise signal. The results show that the strength difference of the vibration excitation signal is lower than that of the environmental noise signal (about -70 dB) in droplet transition form while the former (about -67-62 dB) is stronger than the latter in liquid bridge transition. The present work is useful to monitor the molten drop transition form of fusing wire in LAM.

Key words: laser fuse additive manufacturing; electromagnetic vibration monitoring method; vibration signal; wire transfer mode

0 前言

增材制造(Additive manufacturing, AM)技术, 是一种融合信息技术、新材料技术与制造技术多学科发展的先进制造技术^[1-2]。增材制造技术中, 激光熔丝因为具有能量密度高、材料利用率高及易于制造复杂零件等优点, 在航空航天、汽车、生物医学、

电力等领域有广阔的应用前景^[3-5]。在激光熔丝增材制造过程中, 成形件质量和外观尺寸的精确控制是关键性技术难题, 而液态金属不同过渡方式是影响该问题的重要因素^[6-7]。当为液桥过渡时, 由于过渡过程稳定且无飞溅产生, 焊缝表面成形良好无明显缺陷^[8]。当为滴状过渡时, 由于过渡过程不稳定, 堆积面起伏较大且容易出现未熔合等缺陷。在实际过程中, 因为激光具有光束小、温度极高、光斑移动速度快等特点, 所以滴状过渡状态极易发生变化从而导致成形件质量的稳定性较差。故监测制造过

^{*} 国家重点研发计划(2017YFE0100100)和国家自然科学基金(51675202)资助项目。20170822收到初稿, 20171110收到修改稿

程中的丝材过渡方式对控制成形件质量具有重要的应用价值。但是光-热-声(激光作用点微小(1~3 mm)、温度高、金属蒸汽喷出速度快)等多种能量场的并存使得工作环境异常复杂,难以进行有效精确的监测。目前,如何准确地监测该过程中的丝材过渡状态已成为国内外研究的热点和难点。

针对传统的激光增材制造成形过程监测方法(如:光、声、热),国内外进行了广泛研究。如:SOKOLOWSKI 等^[9]利用光谱仪设备研究等离子体的光信号。通过获得的光信号分析等离子体性质,获取成形件的相关特征,从而实现对过程的检测。但该方法难解决其光信号的采集和传输易受干扰、提取特征信号工作量大导致精度低、实时性差等问题。SHIMADA 等^[10]利用麦克风等设备来采集激光熔丝增材制造中的声信号。通过频谱分析发现,声信号的声压与过渡形式及熔深间存在着一定关系。然而该方法面临着其声信号采集的频率多而杂,处理量大的问题。BLUG 等^[11-12]采用彩色 CCD 摄像测温仪,可以较为精确地测量出熔池表面的温度。分析发现,熔丝温度与成形件质量有关。但是热信号易受等离子体干扰,会造成检测结果误差较大。高会栋等人采用电磁超声检测系统对激光拼焊板的焊缝质量和电阻焊钢管进行了有效检测^[13]。但该方法在检测过程中使用的耦合剂不能适用于高温环境,因此难以用于监测熔滴过渡状态。并且,现有的监测方法均主要面向 5 mm 以上的棒材和线材,难以有效应用于微细(1~2 mm)丝材。

本文针对以上问题,提出了一种有效监测激光熔丝增材制造中微细丝材(1~2 mm)过渡状态的电磁振动监测方法,并且对其进行了可行性验证。本文采用该监测方法还对三种不同材料激光熔丝增材过程中微细丝材(1.2 mm)的过渡方式进行了工艺应用监测试验,成功获得并分析讨论了不同丝材过渡状态下的振动信号特征,验证了该监测方法的工艺应用可行性。

1 电磁振动监测原理及原型装置

电磁振动监测方法的构想如下:① 振动激励装置在丝材上产生振动信号;② 振动信号沿丝材轴向传播;③ 由丝材端部经熔滴过渡传至基板;④ 振动信号在基板上传播;⑤ 振动接收装置采集振动信号;⑥ 专用软件分析处理采集的信号。

振动激励装置由线圈和永磁铁构成。在线圈中通入交变电流,产生交变磁场,在试件表面激励涡流。在非铁磁性丝材上,产生洛伦兹力,引

起振动;在铁磁性丝材上,不仅会产生洛伦兹力,交变的磁场还会产生磁致伸缩效应,两者一同引起振动^[14-15]。

上述原理中,洛伦兹力 F_a 及磁致伸缩力 F_s 分别可由式(1)、(2)计算^[16-17]

$$F_a = \iiint_V [J \times (B_0 + B_m \cos(\omega t))] dV \quad (1)$$

$$F_s = 2YK(B_0)B_0B_m \cos(\omega t) \quad (2)$$

式中, J 为电涡流密度; $B_m \cos(\omega t)$ 为交变磁感应强度; B_0 为永磁铁的磁感应强度, Y 为弹性模量; $K(B_0)$ 为比例系数。

丝材受力后振动产生声波。丝材上的振动方程为

$$\mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{u} - (\lambda + 2\mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \rho \mathbf{f} \quad (3)$$

式中, ρ 为焊丝材料的密度; λ 、 μ 为材料的弹性常数; $\mathbf{u}$ 为焊丝材料上质点移矢量; $\mathbf{f}$ 为体积力密度矢量。

丝材上的振动信号传至基板后将被振动接收装置采集。振动接收装置原理如下:加速度为 a 的振动信号传至压电材料处,会造成压电材料变形。根据压电材料受力特性,由于变形,压电材料表面会产生相应的电荷量或电压量。故可通过采集电荷量或电压量来实现振动信号的接收。常见电荷型振动接收装置结构示意图如图 1 所示。

图 1 常见电荷型振动接收装置结构图

加速度为 a 振动信号传至电荷型振动接收装置下方,引起接收装置振动。假设底座对压电材料支持力为 F_1 ,质量块对压电材料反冲压力为 F_2 ,压电材料截面所受的平均力为 F ,则^[18-20]

$$F_1 = (m_1 + m_2)a \quad (4)$$

$$F_2 = m_2a \quad (5)$$

$$F = \frac{1}{d} \int_0^d \left[(m_1 + m_2)a - m_1a \frac{z}{d} \right] dz = \left(m_1 + \frac{1}{2}m_2 \right) a \quad (6)$$

式中, m_1 为压电材料质量; m_2 为质量块质量; d 为压电材料厚度; z 为厚度方向。

若压电材料厚度方向上的压电常数为 ε ,此时,

压电材料表面处产生电荷量

$$Q = \varepsilon \left(m_1 + \frac{1}{2} m_2 \right) a \quad (7)$$

由于被采集的电荷量信号不稳定,需要进行调理转化成稳定的电压信号,用于信号处理^[19]。

根据上述构想和原理设计出的电磁振动监测系统原型设备,如图 2 所示。主要包括:电磁振动信号激励装置、振动信号接收装置、信号调理装置、信号发射和采集装置、信号处理软件。

图 2 电磁振动监测系统示意图

1. 信号发射采集装置 2. 信号处理软件 3. 熔滴 4. 丝材
5. 电磁振动激励装置 6. 振动信号接收装置 7. 信号调理装置

其中,信号发射装置负责提供信号源;激励装置在丝材上产生振动;接收装置接收基板上的振动信号;采集装置负责采集信号;信号调理装置实现接收信号的转换与放大;信号处理软件对信号进行处理。

2 电磁振动监测方法可行性验证

根据设计,组装完成电磁振动监测系统设备,并对设备激励和接收信号的功能进行验证。采用该设备分别对三种微细丝材(直径 1 mm,长 1 m)进行信号的激励和采集。试验参数设置如表 1 所示。

表 1 试验参数

名称	内容
试验材料	直碳钢、不锈钢、钛合金焊丝
试验设备	电磁振动设备
信号发射频率/kHz	0、15、20
信号发射电压/V	10
信号采集速率/(kS/s)	100
采样时间/s	5
激励、接收距离/cm	80

试验过程中,通过信号处理软件设置参数。首先,设置频率发射参数为 0 kHz、速率采集参数为 100 kS/s,测量未发射(即环境噪声)时信号强度,如图 3 所示,图中纵坐标功率的单位为 dB,为信号的方均根值。然后,随机设置两组发射频率分别为 15 kHz 和 20 kHz、速率采集参数为 100 kS/s,测量三种丝材的振动接收信号。三种丝材的接收信号对比,如图 4 所示。由图可知,发射频率为 15 kHz 时,磁性碳钢丝材接收信号强度的最大值为-47 dB,另两

图 3 通过监测设备采集到的环境噪声

(a) 15 kHz 发射频率下接收信号对比图

(b) 20 kHz 发射频率下接收信号对比图

图 4 信号接收图(平均化处理)

种非磁性丝材接收信号强度的最大值为-70 dB；发射频率为 20 kHz 时，磁性碳钢丝材接收信号强度的最大值为-50 dB，另两种非磁性丝材接收信号强度的最大值为-73 dB。分贝(dB)表示的功率谱是功率谱的一种变体，其变化为

$$N_{db} = 10\lg \frac{P_i}{P_0}$$

(8)

式中， N_{db} 单位为 dB； P_0 为参考功率，其值为 1。由于压电传感器输出的信号电平式很弱，所以 P_i 值很小。经过变体转换为分贝表示的功率谱时，其值为负值。结果表明：不同材质的丝材均能接收到有效的振荡信号，验证了设备激励、接收信号的功能。由于碳钢为磁性丝材同时受到洛伦兹力和磁致伸缩力，丝材受力产生的振动信号最强。因此，在三种丝材中，碳钢丝材接收的信号强度最强。即使为同种丝材，发射频率不同，易知其接收信号的强度也不同，故在实际试验时可根据具体情况设置合适的发射频率。

3 电磁振动监测方法在激光熔丝增材制造中的工艺应用

3.1 应用试验过程

采用最大功率为 4 kW 的 IPG 光纤激光器，对 5 mm 厚的 304 不锈钢板材进行熔丝增材制造试验。试验的工艺参数见表 2。在激光熔丝增材制造试验过程中，通过改变工艺参数(如焊接速度、光丝间距等)以获得不同的熔滴过渡方式。采用研制的电磁振动监测系统设备监测微细丝材(1.2 mm)的过渡状态，采用优化的 21 kHz 频率作为特征频率激励信号。为验证研发的监测设备对丝材过渡状态的准确判断试验中采用高速摄像机以 2 000 帧/s 的速度实时拍摄记录熔滴过渡过程。试验过程及设备分布示意图如图 5 所示。加工现场试验装置如图 6 所示。

图 5 试验过程及设备分布示意图

试验完成后，采用 Origin 软件对采集到的振荡信号数据进行处理，并与高速摄像结果进行对比分析。在不同频率不同工艺下做了多组试验，每组试验结果均能明显的区分出不同的过渡状态。

图 6 加工现场主要试验装备图

1. 激光器 2. 送气枪 3. 送丝枪 4. 振动激励探头
5. 振动接收探头 6. 激光焊接机器人 7. 高速摄像及光源
8. 信号激励与接收装置

表 2 试验工艺参数

名称	内容
焊接材料	5 mm 厚 304L 不锈钢板
焊接设备	光纤激光器
监测设备	电磁振动监测设备
焊接功率/W	3 000
光丝间距/mm	0~3
焊接速度/(m/min)	1.2~1.5
送丝速度/(m/min)	1.6
氩气流量/(L/min)	15
发射频率/kHz	21
采集速率/(kS/s)	100
采集时间/(s/次)	5

3.2 试验结果

经过对激光熔丝增材制造进行多组工艺参数试验, 获得了典型滴状过渡和液桥过渡形式。其中, 图7为焊接速度为1.2 m/min、光丝间距为-3 mm时的丝材滴状过渡的高速摄像照片。图8为焊接速度为1.5 m/min、光丝间距为0 mm时丝材液桥过渡的高速摄像照片。

图7 滴状过渡状态高速摄像照片

图8 液桥过渡状态高速摄像照片

为分析所研发的电磁振荡监测设备对两种典型过渡方式的精确分辨能力, 对相应工艺条件下获得的振荡信号进行了详细分析研究。在此之前, 先需要排除未加工时接收到的环境噪声的信号干扰。试验前未发射信号时测量所获取的频谱图即为环境噪声的频谱图, 如图9所示。横轴表示信号频率, 纵轴表示功率谱(振动信号的幅值)。由图9可知, 识别的噪声水平十分接近-70 dB(振幅或者误差为多大)。因此在本研究条件下, 认为信号达到该噪声标

准(-70 dB)时, 均认为是噪声。

图9 试验前未发射信号时环境噪声

统计了在两种过渡状态下发射和不发射振动信号时每一时刻特征频率下的振动信号强度, 最终得到如图10~12所示的时域图。增材制造过程中丝材为滴状过渡状态时, 电磁振荡监测设备发射0 kHz与21 kHz频率后接收到的振荡信号如图10所示。由图7和图10可知, 在一个熔滴滴落的过程中(选取0~0.4 s时间段、间隔时长0.001 s的采样数据), 0 kHz与21 kHz发射频率下接收到的振荡信号大小和趋势基本一致。由于接收信号的功率不超过-70 dB, 故在滴状过渡状态下的特征频率信号无法由焊丝传递到基板上。

图10 滴状过渡状态, 0 kHz与21 kHz发射频率接收信号时域波形对比

增材制造过程中丝材为液桥过渡状态时, 电磁振荡监测设备发射0 kHz与21 kHz频率后基板接收到的振荡信号如图11所示。在液桥过渡状态下, 为保证能与滴状过渡对比, 也选取0~0.35 s时间段、间隔时长0.001 s的采样数据分析。由图11可知, 发射频率为0 kHz时, 接收信号强度要低于-70 dB, 可视作噪声。发射频率为21 kHz时, 接收到的振荡信号稳定, 功率可达-67~-62 dB, 明显高于噪声

功率 -70 dB。因此,液桥过渡状态下的特征频率振动信号可由焊丝传递到基板上。

图 11 液桥过渡状态下 0 kHz 与 21 kHz 发射频率下试验接收信号时域波形对比图

图 12 为 21 kHz 发射频率下两种丝材过渡状态接收到的振荡信号特征比较图。由图可知,两种过渡状态下接收到的振荡信号功率强度均明显有别于噪声标准:滴状过渡状态下接收信号强度大部分均远低于噪声标准(-70 dB);而液桥过渡状态下的接收振动信号强度($-67\sim-62$ dB)明显高于噪声标准。根据图 12 数据,还可知液桥过渡时平稳,振荡信号在丝材上传递和最后被接收均较稳定。而滴状过渡状态下由于丝材不断发生形变、熔化、延伸、熔断、滴落,接收到的信号波动剧烈。这些由监测设备获得的信号特征证实了本文所提出的监测方法和研发的监测设备能够用于精确分辨激光熔丝增材制造过程中微细丝材的过渡状态。

图 12 大熔滴过渡状态与液桥过渡状态下振动信号时域波形对比图

4 结论

(1) 提出了一种在线监测熔丝增材制造中微细

丝材($1\sim 2$ mm)过渡状态的电磁振动监测方法。系统阐明了监测方法的物理原理,并研制了原型设备。该原型设备主要包括:信号发射采集装置、电磁振动激励装置、振动信号接收装置、信号调理装置和信号处理软件。

(2) 对电磁振动监测方法的可行性进行了验证。结果表明:激励装置在丝材上产生的振动信号可以通过丝材传递到基板上并被信号接收装置采集。发射频率一定(设为 15 kHz)时,接收到的磁性丝材信号强度(-47 dB)会高于非磁性丝材(-70 dB)。

(3) 在激光熔丝增材制造过程中,丝材为滴状过渡时,基板接收到的振动信号波动剧烈,其强度大部分远低于环境噪声标准(-70 dB)。丝材为液桥过渡时,接收到的振荡信号较稳定,且其强度($-67\sim-62$ dB)明显高于环境噪声标准。因此,所提出的电磁振荡监测方法能够有效地监测分辨激光熔丝增材制造丝材过渡状态,可能为进一步提高加工质量提供有效工具。

参 考 文 献

- [1] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 129-135.
LI Dichen, HE Jiankang, TIAN Xiaoyong, et al. Additive manufacturing: Integrated fabrication of macro/microstructures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 129-135.
- [2] 杨永强, 宋长辉, 王迪, 等. 激光选区熔化技术及其在个性化医学中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(21): 140-151.
YANG Yongqiang, SONG Changhui, WANG Di, et al. Selective laser melting and its applications on personalized medical parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(21): 140-151.
- [3] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.
WANG Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [4] 张小伟. 金属增材制造技术在航空发动机领域的应用[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 10-16.
ZHANG Xiaowei. Application of metal additive manufacturing in aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 10-16.
- [5] 宋晓艳, 邢金峰. 双光子聚合 3D 打印[J]. 化工学报, 2015, 66(9): 3324-3332.
SONG Xiaoyan, XING Jinfeng. 3D printing technology based on two-photon polymerization[J]. CIESC Journal,

- 2015, 66(9): 3324-3332.
- [6] WANG Z, WANG H, LIU D. Microstructure and mechanical properties of AF1410 ultra-high strength steel using laser additive manufacture technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403001.
- [7] CHEN H, GU D, GU R, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of 5CrNi4Mo die steel parts by selective laser melting additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0203003.
- [8] AGAPAKIS J E, BOLSTAD J. Vision-aided monitoring and control of thermal spray, spray forming, and welding processes[C/CD]//Technology 2002: The Third National Technology Transfer Conference and Exposition, Volume 1, 1993.
- [9] SOKOLOWSKI W, HERZIGER G, BEYER E. Spectroscopic study of laser-induced plasma in the welding process of steel and aluminium[C]//1989 Intl Congress on Optical Science and Engineering. International Society for Optics and Photonics, 1989: 288-295.
- [10] SHIMADA W, OHMINE M, HOSHINOUCI S, et al. A study on in-process assessment of joint efficiency in the laser welding process[J]. Fundamental and Practical Approaches to the Reliability of Welded Structures, 1982, 1: 175-180.
- [11] BLUG A, CARL D, HÖFLER H, et al. Closed-loop control of laser power using the full penetration hole image feature in aluminum welding processes[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 720-729.
- [12] LI L, STEEN W, MODERN P. Melt pool behaviour detection and adaptive control of laser surface treatment through machine vision[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1994, 2306(1): 119-133.
- [13] 高会栋. 电磁超声技术在焊缝检测中的应用[J]. 无损检测, 2010, 32(11): 850-853.
- GAO Huidong. EMAT and its application in weld inspection[J]. Non Destructive Testing, 2010, 32(11): 850-853.
- [14] JAFARI-SHAPOORABADI R, KONRAD A, SINCLAIR A N. Improved finite element method for EMAT analysis and design[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(4): 2821-2823.
- [15] 李鹏, 黄松岭, 王琬, 等. 一种电磁超声检测用脉冲激励电源的研制[J]. 电测与仪表, 2012, 49(2): 76-79.
- LI Peng, HUANG Songling, WANG Shen, et al. Development of a pulse exciting source for electromagnetic ultrasonic detection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(2): 76-79.
- [16] 郝宽胜, 黄松岭, 赵伟, 等. 基于二阶矢量位的矩形截面回折线圈阻抗和脉冲磁场的解析建模与计算[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 791-800.
- HAO Kuansheng, HUANG Songling, ZHAO Wei, et al. Analytical modelling and calculation of impedance and pulsed magnetic field for rectangular meander coil based on second order potential[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(7): 791-800.
- [17] JIAN X, DIXON S, EDWARDS R S, et al. Coupling mechanism of an EMAT[J]. Ultrasonics, 2006, 44: e653-e656.
- [18] TIAN L, XU Z P, XIE S, et al. Experimental study of magnetostrictive ultrasonic guided wave for pipeline corrosion testing[J]. Petro-Chemical Equipment, 2015, 44(6): 16-21.
- [19] 胡广书. 数字信号处理理论、算法和实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- HU Guangshu. Digital signal processing principles, algorithms, and realization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [20] 于润祥, 石庚辰, 隋丽, 等. 一种新型压电加速度传感器研究[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(3): 273-276.
- YU Runxiang, SHI Gengchen, SUI Li, et al. A novel piezoelectric accelerometer with switch characteristic[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(3): 273-276.
-
- 作者简介: 黄安国, 男, 1975 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为新型材料的先进连接方法及工艺和焊缝组织行为特征及模拟。
E-mail: huang-anguo@mail.hust.edu.cn
庞盛永(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为材料成形模拟、材料激光加工、焊接工艺与装备。
E-mail: spang@hust.edu.cn