DOI: 10.3901/JME.2019.19.167

激光-MAG 复合焊接过程金属蒸气和背部熔池图像分析*

王煜 高向东 陈子琴 黎扬进

(广东工业大学广东省焊接工程技术研究中心 广州 510006)

摘要: 在激光-MAG 复合焊中, 金属蒸气和背部熔池包含着大量的焊接状态信息。以 316 不锈钢和 400 低碳钢为试验对象, 作异种材料复合焊接, 并应用高速摄像机获取焊接过程中正面金属蒸气和背部熔池的实时图像。提取金属蒸气面积形态特征, 结合背部熔池图像同步分析金属蒸气周期性变化规律并研究金属蒸气和焊接状态、焊缝成形之间的关系。以灰度共生矩阵 (GLCM) 方法分析图像纹理特征, 并用能量、对比度和熵三个特征分析背部熔池与焊缝成形之间的关系。结果表明, 所分析方法能有效反映金属蒸气的变化机理, 金属蒸气和背部熔池与焊接状态之间的关联, 为在线检测复合焊接质量提供依据。

关键词: 复合焊接; 图像处理; 金属蒸气; 背部熔池; 灰度共生矩阵; 焊接状态

中图分类号: TG409

Analysis of the Images of Metal Vapor and Bottom-molten Pool in Laser-MAG Hybrid Welding Process

WANG Yu GAO Xiangdong CHEN Ziqin LI Yangjin

(Guangdong Provincial Welding Engineering Technology Research Center,
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006)

Abstract: In the process of laser-MAG hybrid welding, the metal vapor and bottom-molten pool include plenty of welding information. Taking the hybrid welding of 316 austenitic steel and 400 mild steel plates as example, two high-speed cameras are used to capture the real-time images of top-vapor and bottom-molten pool. Through extracting metal vapor area morphological feature, the cyclic variation rule of metal vapor is synchronously analyzed combining with the bottom-molten images. The relationship among metal vapor, welding status and weld formation is researched. Image texture features are analyzed by taking advantage of GLCM method (gray level co-occurrence matrix). Angular second moment energy, contrast and entropy of an image are used to explore the relationship between bottom-molten pool and the weld formation. Experiment results show that the proposed method can reflect the mechanism of metal vapor as well as the correlation among metal vapor, bottom-molten pool and welding status effectively. It provides a basis for real-time monitoring in laser-MAG hybrid welding process.

Key words: hybrid welding; image processing; metal vapor; bottom-molten pool; GLCM; welding status

0 前言

激光-电弧复合焊相对于激光焊或电弧焊, 能提高焊缝成形质量、焊接稳定性和速度, 增加熔深^[1-2], 焊接厚板时能成形良好焊缝, 同时也解决了激光焊接装配精度过高的不足, 在工业上具有广泛的应用前景^[3-4]。目前, 对复合焊接研究主要

集中在复合焊接过程的机理和焊接参数变化对焊接质量的影响方面^[2]。机理研究包括对熔滴过渡状态、金属等离子体和熔池流动状态分析。利用高速摄像机可以对熔滴过渡受力和熔滴过渡模式进行分析^[5], 利用光谱仪可对金属等离子体耦合机理和激光能量利用率进行分析^[6-7], 通过建立流体流动数值分析模型对熔池分析, 能反映熔池流动模式的主要特征^[8]。

目前根据特征参数对焊接过程稳定性研究主要在激光焊接方面, 主要包括提取金属蒸气图像面积、金属飞溅数量和匙孔面积等特征分析焊接状态^[9], X

* 国家自然科学基金(51675104)、广东省科技计划(2016A010102015)和广东省教育厅创新团队(2017KCXTD010)资助项目。20181023 收到初稿, 20190420 收到修改稿

射线能谱诊断^[10],用图像处理恢复 X 光侧面退化图像,分析焊缝成形,并结合近红外高速相机预测焊缝的熔深和熔宽^[11]。

在激-MAG 复合焊接过程,背部熔池图像可以有效反映激光能量的利用率和背部焊接状态^[12],因此采用双高速摄像机同时摄取金属蒸气和背部熔池的瞬时信息并提取形态特征,不仅可以结合背部熔池图像和金属蒸气特征参数变化对复合焊接过程机理进行同步分析和焊接状态的研究,还可利用背部熔池图像分析焊缝成形。试验表明,金属蒸气和熔池特征参数变化在整个焊接过程中与焊接状态和焊

缝成形密切相关,可为实现复合焊接过程的实时状态检测提供试验依据。

1 试验装置

试验装置包括大功率盘形激光焊接装置(Trumpf-16002)、电弧焊接器为 MIG/MAG 焊机(Panasonic YD-350GE)、松下六关节机器人、激光焊接头、保护气体装置及图像采集系统,如图 1 所示。试验材料为 SUS316 不锈钢和 SS400 低碳钢,焊件尺寸为 150 mm×60 mm×6 mm。

图 1 复合焊接装置示意图

为了分析焊件的侧面金属蒸气以及电弧的瞬态特性,建立准确的焊缝成形预测模型,将配备有红外-可视光滤波装置的单色高速摄像机安装焊件的侧面,获取金属蒸气图像。彩色摄像机装置可见光滤波系统获取焊件背面的熔池形态特征。试验中高速摄像机的采集速度为 5 000 f/s,激光波长为 1 030 nm,激光功率为 2~5 kW,焊接速度为 0.5 m/min,聚焦位置为-2 mm,电弧电流大小为 100 A,电流的波形为脉冲型,焊嘴到工件的距离为 10.5 mm,焊丝的牌号为 MG-50,焊丝直径为 1.2 mm,焊嘴与水平面夹角为 45°,光纤间距为 2 mm,保护气体由 80%Ar 和 20%CO₂ 组成,气体流量设置为 40 L/min。

电压为 10 V,焊接速度为 0.5 m/min 时为例,应用高速单色摄像机摄取连续的金属蒸气和飞溅动态图像,取第 96 帧图像为例。图 2 为金属蒸气图像处理的流程和最后得到的结果。

图 2 金属蒸气图像处理

2 正面图像特征提取与分析

2.1 金属蒸气图像处理

以激光功率为 3 kW,电弧电流为 100 A,电弧

将金属蒸气和飞溅单色图转化为灰度级为 8 的灰度图像,并将图片进行裁剪提取感兴趣(ROI)区域,通过中值滤波去除噪声,得到细节和飞溅数量均与滤波图一致的灰度图像。通过大津算法(Otsu)

保留图像主要细节和去除小部分金属飞溅。最后通过删除小面积方法去除金属飞溅和熔池后得到金属蒸气的二值化图像。

2.2 金属蒸气变化机理和焊接状态同步分析

从上述试验条件下选取其中 200 帧进行金属蒸气面积 S 特征提取并结合背部熔池图像同步分析。其中,通过面积 S 来描述金属蒸气大小,但激光和电弧耦合过程的时候,原有的金属蒸气变化为电弧和金属蒸气的耦合体,所以此时提取的面积为耦合

面积。如图 3 所示,在只有激光作用时,提取的金属蒸气面积呈现出有规律性上下波动,而从整体上看,提取的特征曲线也呈现周期性变化。其中,通过对正面金属蒸气和背部熔池图像整体观察发现,焊件正表面金属蒸气的变化会在 0.5 ms 后影响背部熔池的状态。这种延时现象可能是由于热传导和熔池流动造成的时间差。所以图 3 中的时刻对应焊件正表面在此时刻的图像,其背部熔池图像为对应时刻延迟 0.5 ms 的图像。

图3 金属蒸气和背部熔池变化图

金属蒸汽中的微纳米颗粒会吸收和散射激光能量^[13]。图 3 中 t 时,在大功率盘型激光的照射下,工件表面金属瞬间熔化形成匙孔,并在匙孔上方溢出大量金属蒸气。从 t 至 $t+1.5$ ms 期间,由于微纳米颗粒的影响,在同种激光功率下金属蒸气面积上下波动。例如相对于 $t+0.5$ ms 时刻的金属蒸气,在 t 时的金属蒸气较大,产生的微纳米颗粒较多,使直接作用在金属表面的激光能量下降,导致在 $t+0.5$ ms 时刻匙孔喷发出的金属蒸气量减少从而金属蒸气变小。当金属蒸气变小时,微纳米颗粒的减少致使金属表面吸收激光能量提高,金属蒸气变大。所以在 $t+1$ ms 时刻,金属蒸气体积恢复到相似于 t 时的状态。因为金属蒸气对激光能量的周期性影响从而导致金属蒸气的形态也呈现出周期性上下波动,提取的金属蒸气面积规律性的上下波动。而此阶段背部熔池图像并无明显的变化,背部匙孔处于半封闭状态且无金属蒸气从匙孔喷出,整体趋于稳定的状态。

激光电弧耦合时产生的耦合体大小对焊接稳定性有很大的影响^[14]。图 3 中 $t+22.5$ ms 和 $t+60.5$ ms

为电弧和激光发生耦合作用的前一时刻,此时正面金属蒸气和背面熔池均处于平稳状态。当在 $t+23$ ms 和 $t+61$ ms 时刻,电弧的加入打破了原有金属蒸气内的平衡状态,电弧焊丝端部熔化产生新的离子和电子,由于最小电压原理,电弧被激光金属蒸气所吸引,焊丝端部、金属蒸气、焊件形成回路,金属蒸气和电弧之间会产生电离通道。电弧中的正离子通过电离通道进入激光金属蒸气中,电弧会沿着电离通道扩展,表现为电弧会被金属蒸气吸引形成耦合体,且加宽了电弧作用范围,起到稳弧的作用。耦合体大小对焊接质量的影响可分为正面和负面两种情况。从正面影响分析,耦合体越大,说明电弧扩展范围越大,电弧越稳定,预热效果越强,而且电弧和金属蒸气相互作用越强,意味着热源相互作用的增大,增加焊接熔化效率。但从不利因素分析,耦合体内部存在逆韧致辐射作用,耦合体越大,逆韧致辐射作用越强,其对激光束的散焦和吸收作用越强,造成作用在焊件表面的能量的损失越大。所以综合这两方面因素,激光和电弧发生耦合作用产生的耦合体大小是影响复合焊接过程焊接状态的关

键因素,而背部熔池图像的状态可以反映焊件表面对激光能量的吸收情况,激光能量利用率越高,背部熔池图像的匙孔信息更加明显。

选取三个电弧和激光耦合过程并分别定义为 K_1 、 K_2 和 K_3 ,如图 3 所示。对比 K_1 和 K_2 峰值时刻的耦合体面积, $t+23$ ms 耦合体面积大约为 $t+61$ ms $\sim t+61.5$ ms 耦合体面积的两倍,通过观察其影响的背部熔池图像中匙孔的大小,前者背部匙孔已经完全打开,并且有适量的金属蒸气喷出,而后者背部匙孔仅部分打开。说明这两个时段的耦合体主要影响焊接熔化效率,耦合体过小不利于焊接熔化效率,所以 K_2 为不稳定焊接状态。另一方面,对比 K_1 和 K_3 峰值时刻的耦合体面积, K_3 在峰值时刻 $t+77$ ms 的耦合体面积是 K_1 在峰值时刻 $t+23$ ms 的 1.5 倍,但对比两者的背部熔池图像, $t+77$ ms 时刻对应的背部匙孔打开的部分反而变得更小。再横向对比 K_3 不同时刻耦合体对背部匙孔的影响,在 $t+76.5$ ms 和 $t+78$ ms 时刻耦合体面积大小约等同于 K_1 峰值时刻耦合体面积大小,这两个时刻对应的背部匙孔也已经完全打开。说明当耦合金属蒸气面积过大时,如 K_3 峰值时刻 $t+77$ ms,耦合体对激光束散焦和吸收处于主导作用,造成作用在焊件表面的能量的损失,导致其背部匙孔打开程度变小,所以 K_3 也为不稳定焊接状态。综上所述,只有耦合体面积处于恰当的大小,才能平衡激光能量损失和热源相互作用时的熔化效率,达到稳定焊接状态,相对于 K_2 和 K_3 , K_1 金属蒸气面积大小合适,所以 K_1 为稳定焊接状态。当熄弧时,金属蒸气恢复到 $t \sim t+1.5$ ms 状态。结合背部熔池图像和通过金属蒸气面积大小规律性变化的分析,金属蒸气的形态特征可以反映焊接状态。

2.3 不同功率下金属蒸气面积分析

对不同激光功率焊接过程中获取的所有金属蒸气图像序列进行特征提取并计算金属蒸气的平均面积特征参数,图 4 为金属蒸气平均面积特征参数的

图 4 不同功率下金属蒸气面积平均值

平均值激光功率 P 从 2 kW 增大到 5 kW,焊缝的正面图和背面图如图 5a、5b 所示。

图 5 不同激光功率下的焊缝成形

由图 4 可以看出,随着激光功率的增加,金属蒸气的面积 S 先增大后减小,在激光功率为 4 kW 条件下 S 达到最大值。在激光功率为 5 kW 时 S 骤减,结合图 5 可以看出,焊缝背面出现大量飞溅的焊接缺陷,这是由于激光功率过大产生过熔透现象,金属蒸气从焊件背面大量溢出,并造成了大量背部金属飞溅,也导致了焊件正表面的金属蒸气喷发量减小,所以提取的金属蒸气 S 骤然减小,同时也致使在激光功率为 5 kW 时,背面焊缝宽度没有明显变化。综上所述,随着激光功率的增大,金属蒸气体积增大, S 增大,热源相互作用增大,预热效果越强,增加焊件正表面熔化效率,预热的金属表面对激光的反射率大大降低,提高了工件对习惯能量的吸收率,激光更容易穿透焊件,从而使正面的焊缝平均高度降低,背面焊缝的平均宽度有所增大。

3 背部图像特征提取和分析

3.1 纹理特征——灰度共生矩阵(GLCM)

灰度共生矩阵反映了纹理图像中各灰度值在空间上的分布特性,是一种分析图像纹理特征的重要方法^[15]。矩阵的值由距离为 d 、方向 θ 的像素对出现的频率定义。其中,通常情况下 θ 的取值为 0° , 45° , 90° , 135° 。若图像 f 共有 k 个灰度级,那么有 $k \times k$ 大小的共生矩阵 Q ,如式(1)所示

$$Q = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} \varphi(0,0) & \cdots & \varphi(k,0) \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi(0,k) & \cdots & \varphi(k,k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\varphi(f_1, f_2)$ 是像素对在相对位置 (d, θ) 的数量; 灰度值分别为 f_1 和 f_2 ; R 是像素对的总数。相对距离 d 取值为 1, 定义并根据式(2)~(4)计算能量 T_1 、对比度 T_2 和熵 T_3 三个特征参数。将每个特征参数在四个方向取平均值作为特征矢量

$$T_1(n) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (N(i, j, \theta))^2 \quad (2)$$

$$T_1 = \frac{1}{4} \times \sum_{n=1}^4 T_1(n)$$

$$T_2(n) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (i-j)^2 N(i, j, \theta) \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{1}{4} \times \sum_{n=1}^4 T_2(n)$$

$$T_3(n) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k N(i, j, \theta) \log N(i, j, \theta) \quad (4)$$

$$T_3 = \frac{1}{4} \times \sum_{n=1}^4 T_3(n)$$

式中, $N(i, j, n)$ 为对应矩阵第 i 行第 j 列的值。当 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 时, $n=1, 2, 3, 4$ 。

3.2 背部熔池特征分析

将激光功率为 2 kW 条件下的焊件背部熔池图像转换为 16 灰度级灰度图, 取其 7 000 帧进行灰度共生矩阵特征提取, 图 6 为选取的 7 000 帧所对应的背部焊缝位置和特征参数提取结果。因为焊缝背面有未熔透和熔透两种成形状态, 将背面熔透部分定义为 A 。如图 6 所示, 将不同的熔透区域按顺序定义为 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 。

图 6 灰度共生矩阵特征参数

在灰度共生矩阵中, 能量 T_1 、对比度 T_2 和熵

T_3 分别代表纹理的均匀程度、清晰度和复杂程度。能量 T_1 值越大, 纹理越均匀; 对比度 T_2 值越大, 纹理越清晰; 熵 T_3 的值越大, 纹理越多和复杂。因此, 未熔透部分的特征值和熔透部分的特征值有明显的差别。如图 6 所示, 因为未熔透部分的背部熔池图像无任何成像, 而在熔透区域拍摄的图像有明显的熔池和匙孔信息, 所以未熔透区域图像表现得更为均匀, 所以 T_1 的值趋近于 1, 熔透区域的纹理相比于未区域的纹理而言更加清晰和复杂, T_2 和 T_3 的值趋近于 0。而且在熔透区域中(以熔透区 A_2 为例), 从实物图可以发现焊缝两端的宽度比较窄而在焊缝中间的宽度较大。随着背部焊缝宽度不同变化, 三个特征参数随着背部焊缝宽度的变化而改变, 背部焊缝宽度先增大后减小, T_1 的值先减少后增加而 T_2 和 T_3 的值呈现相反趋势, 其中在 T_1 和 T_3 两个特征参数变化更加明显。背部焊缝宽度越大, 在焊接过程中熔透程度越剧烈, 背部熔池图像越明亮越清晰, 所以其对比度值越大, T_2 越大, 且熔池流动越剧烈, 所以纹理流动信息越多流动状态也越复杂, 其图像的纹理均匀程度也就越低, 所以 T_3 越大 T_1 越小。

3.3 不同功率下灰度共生矩阵分析

对不同激光功率下获得的所有背部熔池图像进行灰度共生矩阵中三个特征参数的提取并统计其平均值, 如图 7 所示。

图 7 不同功率下能量、对比度和熵平均值

特征曲线整体的变化规律与上述分析一致, 随着激光功率 P 的增加, 背部焊缝宽度变大, 所以 T_1 逐渐变小而 T_2 和 T_3 逐渐变大。在激光功率为 5 kW 时, 由于背部焊缝宽度没有明显的变化, 所以特征值 T_1 和 T_2 无明显的变化。而 T_3 有明显的增大, 这是由于当激光功率 5 kW 时大量金属蒸气从焊件背部匙孔溢出伴随着大量的金属飞溅, 致使提取的纹理变多, 纹理更加复杂。

4 结论

(1) 同步分析金属蒸气特征参数面积 S 的变化

和背部熔池图像状态,结果表明 S 反映复合焊接过程的变化, S 呈现规律的周期性变化。在金属蒸气和电弧耦合过程中,耦合体过大会导致激光能量的损失,为不稳定焊接状态,耦合体过小会导致熔化效率降低,为不稳定焊接状态。

(2) 随着激光功率的增加,正面焊缝高度降低,背面焊缝宽度和高度增大,金属蒸气面积均值变大。当激光功率为 5 kW 时产生过熔透现象,造成大量金属飞溅,所以背部焊缝宽度无明显变化。

(3) 背部熔池灰度共生矩阵特征参数能量、对比度和熵的统计规律表明,特征参数能明显区分未熔透区域和熔透区域。且背部焊缝宽度越大,熔池流动状态更加复杂导致图像纹理均匀程度越低(T_1 越小)、纹理越多、复杂和清晰(T_2 和 T_3 越大)。背部熔池流动的纹理特征参数可以有效反映焊缝背部的宽度和预测焊缝成形。

参 考 文 献

- [1] LEE C M, WOO W S, BAEK J T, et al. Laser and arc manufacturing processes: A review[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2016, 17(7): 973-985.
- [2] CHEN Minghua, LI Xueyuan, LIU Liming. Effect of electric field on interaction between laser and arc plasma in laser-arc hybrid welding[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(8): 2045-2050.
- [3] BUNAZIV I, AKSELSSEN O M, SALMINEN A, et al. Fiber laser-MIG hybrid welding of 5 mm 5083 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233: 107-114.
- [4] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laser hybrid welding[J]. Journal of Laser Applications, 2004, 17(1): 2-14.
- [5] 徐春鹰, 刘双宇, 张宏, 等. 激光-电弧复合焊过程的熔滴过渡特征与受力分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(6): 154-161.
XU Chunying, LIU Shuangyu, ZHANG Hong, et al. Study on the characteristics and mechanics of droplet transfer in laser arc hybrid welding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(6): 154-161.
- [6] 李志勇, 王威, 王旭友, 等. 基于光谱的激光—MAG 复合焊耦合机理分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 62-67.
LI Zhiyong, WANG Wei, WANG Xuyou, et al. Analysis of laser-MAG hybrid welding coupling mechanism based on spectrum[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8): 62-67.
- [7] 张旺, 李芳, 李敏, 等. 基于光谱分析的 CO₂ 激光+脉冲 GMAW 复合焊峰值状态激光能量传输研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(4): 913-918.
ZHANG Wang, LI Fang, LI Min, et al. Study of the laser absorption characteristics of CO₂ laser-pulsed GMAW hybrid welding based on spectral diagnosis technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(4): 913-918.
- [8] 胥国祥, 张卫卫, 刘朋, 等. 激光+GMAW 复合热源焊熔池流体流动的数值分析[J]. 金属学报, 2015, 51(6): 713-723.
XU Guoxiang, ZHANG Weiwei, LIU Peng, et al. Numerical analysis of fluid flow in laser+GMAW hybrid welding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(6): 713-723.
- [9] YOU Deyong, GAO Xiangdong, KATAYAMA S. Detection of imperfection formation in disk laser welding using multiple on-line measurements[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219(219): 209-220.
- [10] 刘利锋, 肖沙里, 钱家渝. 激光金属蒸气 X 射线能谱诊断[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1192-1196.
LIU Lifeng, XIAO Shali, QIAN Jiayu. X-ray spectral diagnosis for laser plasma[J]. Opt. Precision Eng., 2017, 25(5): 1192-1196.
- [11] 高向东, 李竹曼, 游德勇, 等. 激光焊匙孔特征的近红外与 X 射线传感分析[J]. 光学精密工程, 2016, 34(10): 2400-2407.
GAO Xiangdong, LI Zhuman, YOU Deyong, et al. Analysis of laser welding keyhole characteristics based on near-infrared high speed camera and X-ray sensing[J]. Opt. Precision Eng., 2016, 34(10): 2400-2407.
- [12] PAN Q, MIZUTANI M, KAWAHITO Y, et al. High power disk laser-metal active gas arc hybrid welding of thick high tensile strength steel plates[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(1): 012004.
- [13] 邹江林, 李飞, 牛建强, 等. 高功率光纤激光焊接羽辉对焊接过程的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603005
ZOU Jianglin, LI Fei, NIU Jianqiang, et al. Effect of laser-induced plume on welding process during high power fiber laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0603005
- [14] 高明, 曾晓雁, 严军, 等. 激光-电弧复合焊接的热源相互作用[J]. 激光技术, 2007, 31(5): 465-468.
GAO Ming, ZENG Xiaoyan, YAN Jun, et al. Heat sources interaction of laser-arc hybrid welding[J]. Laser

Technology , 2007 , 31(5) : 465-468.

- [15] SOH L K , TSATSOULIS C. Texture analysis of SAR sea ice imagery using gray level co-occurrence matrices[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing , 1999 , 37(2) : 780-795.

作者简介：王煜，男，1993 年出生。主要从事激光-MAG 复合焊接、机器视觉和信号分析方面的研究。

E-mail: a74846h669@outlook.com

高向东(通信作者)，男，1963 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要从事焊接自动化方面的研究。

E-mail: gaoxd@gdut.edu.cn