DOI: 10.3901/JME.2013.10.110

铝合金激光+脉冲 GMAW 复合焊焊缝成形的预测*

张维明¹ 武传松¹ 秦国梁¹ 王旭友²

(1. 山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室 济南 250061;
2. 机械科学研究院哈尔滨焊接研究所 哈尔滨 150080)

摘要: 对铝合金激光+脉冲熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)复合热源焊接过程进行数值模拟, 将为优化焊接工艺参数和保证焊接质量提供理论依据, 具有重要意义。根据铝合金大功率激光+脉冲 GMAW 复合热源焊接的特点, 考虑光致等离子体和金属蒸汽羽的影响, 对小孔内激光能量的吸收与小孔壁蒸发损失加以恰当处理, 对原有小孔模型进行改进, 提高了激光致小孔形状与尺寸的计算精度。利用计算出的小孔形状尺寸对激光体积热源分布参数进行标定, 建立铝合金大功率激光+脉冲 GMAW 复合焊接的焊缝形状尺寸预测模型。对焊接温度场和焊缝成形进行数值模拟, 获得多种工艺条件下高强铝合金复合热源焊接焊缝成形的数值分析数据。复合热源焊接工艺试验结果表明, 铝合金复合焊焊缝形状尺寸的计算结果与试验结果总体吻合良好。

关键词: 复合焊 铝合金 焊缝形状尺寸预测 试验验证

中图分类号: TG456

Prediction of Weld Shape and Size for Laser+GMAW-P Hybrid Welding of Aluminium Alloys

ZHANG Weiming¹ WU Chuansong¹ QIN Guoliang¹ WANG Xuyou²

(1. Key Laboratory for Liquid-Solid Structure Evolution and Materials Processing of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061;
2. Harbin Welding Institute, China Academy of Machinery Science & Technology, Harbin 150080)

Abstract: High power laser + pulsed gas metal arc welding(GMAW)hybrid welding is an advanced welding process in manufacturing light weight structures. For aluminium alloys, its reflection rate is much higher than steels, thus, the previous keyhole model for steels has to be modified. With considering the characteristics of high power laser+pulsed GMAW hybrid welding of aluminium alloys, the effect of metal steam plume and laser-induced plasma on the laser power absorption inside keyhole is dealt with, the previous model of keyhole profile is improved, and the calculation accuracy of laser-induced keyhole profile is enhanced. The distribution parameters of volumetric heat source for laser beam are calibrated by using the calculated keyhole profile. The predicting model of weld shape and size is established to determine the weld dimensions in hybrid welding of aluminium alloys. Through numerical analysis of temperature field and weld geometry, the data about the weld formation in hybrid welding of aluminium alloys are obtained under different conditions. High power laser + pulsed gas metal arc hybrid welding experiments validate that the calculated results are in good agreement with experimentally measured ones.

Key words: Hybrid welding Aluminium alloys Weld shape and size prediction Experimental validation

0 前言

解决高强铝合金的焊接问题是实现结构轻量化的前提条件。传统的铝合金焊接主要采用氩弧焊

和变极性等离子弧焊等焊接方法, 但是, 这些焊接方法效率低、变形大、可焊铝合金种类有限。而单独采用激光焊来连接铝合金时, 存在反射率高、搭桥性能差、气孔等问题。近年来, 人们开始尝试应用激光+熔化极电弧复合热源焊来连接高强铝合金材料^[1]。实现各种工艺条件下高强铝合金激光+脉冲熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)

* 科技部中俄国际合作重点资助项目(2009DFR50170)。20121115 收到初稿, 20130326 收到修改稿

复合焊接焊缝成形(焊缝形状与尺寸)的预测,对于工艺优化和质量控制具有重要意义。为此,需要建立复合焊接的热源模型和焊接温度场数值分析模型。复合热源焊接过程中,激光作用的小孔机制决定了焊缝熔深和工件上的热过程。如何确定小孔的形状和尺寸,是复合焊接焊缝成形预测的一个重要问题。KAPLAN^[2]通过考虑工件不同厚度处小孔壁吸收激光能量速率的不同,根据小孔壁上的局部能量平衡,建立了线热源小孔模型。但线热源模型在确定局部小孔壁吸收的能量 I_a 时,忽略了光线在小孔内多次反射过程中吸收光能的孔壁具体位置的计算,仅通过将小孔假定为锥体,估算光线经多次反射后被孔壁吸收的总的能量分数。这种处理光线多次反射和 Fresnel 吸收的方式过于简单,不能合理地描述激光能量在小孔内的分布特征。张转转等^[3]通过合理描述激光能量在小孔内的分布特征,采用光线追踪法^[4]处理光线在小孔内的多次反射和孔壁的 Fresnel 吸收,对线热源小孔模型做出了改进,但是主要针对的是 TCS 不锈钢复合焊接且激光功率比较小的工艺条件。

高强铝合金激光+脉冲 GMAW 复合热源焊接时,对激光反射较强,采用的激光功率较大,有独特的工艺特点。因此,需要对基于“线热源-光线追踪”法的小孔模型^[3]进一步做出适当的改进。本文通过对小孔内激光能量的吸收与小孔壁蒸发损失加以恰当处理,对原有小孔模型进行改进,提高了小孔形状与尺寸的计算精度。在此基础上,利用计算出的小孔形状尺寸对激光体积热源分布参数进行标定,确定铝合金复合焊接的体积热源分布参数^[5-7],建立了铝合金大功率激光+脉冲 GMAW 复合焊接的焊缝形状尺寸预测模型,并给予了试验验证。这对于深入研究高强铝合金激光+脉冲 GMAW 复合热源焊接机理^[8-9],有重要意义。

1 复合焊工艺试验

与一般钢材相比,铝合金对激光束反射率很高,接近 80%^[10]。由于对激光反射率大、且热导率高,在实际铝合金的激光焊接过程中,一般采用大功率激光,并且要保证良好的光束聚焦。本研究开展了高强铝合金激光+脉冲 GMAW 复合热源焊工艺试验,采用额定功率为 6 kW 的光纤激光器。脉冲 GMAW 焊接电源为 Fronius TPS5000 数字化电源,对于一定材料和直径的焊丝,焊接电流、电弧电压、送丝速度等焊接规范参数可实现一体化调节。

主要工艺条件如下:激光波长为 1.07 μm ,激光枪在前,脉冲 GMAW 焊枪在后;激光枪前倾 10°,两枪夹角 40°,光-丝间距为 4 mm;焊丝型号为 ER5087,直径为 1.2 mm,焊丝干伸长为 18 mm。保护气体为纯 Ar 气。在板厚为 12 mm 的铝合金板上进行复合焊堆焊试验。铝合金型号为 6005A,成分如表 1 所示。复合焊接试验中,激光功率、焊接电流、焊接速度变化,考察焊接工艺参数对焊缝成形的影响。选择二个具有代表意义、焊缝成形良好的值进行试验。焊接电流和电弧电压取一个脉冲周期内的平均值。6 种工艺条件下的主要参数取值见表 2。图 1 给出了两种工艺条件下的铝合金复合焊缝成形貌。

表 1 6005A 铝合金的化学成分 %

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
质量分数	0.71	0.16	0.14	0.22	0.62
元素	Cr	Zn	Ti	Al	
质量分数	0.002 96	0.009 4	0.024	余量	

表 2 激光+脉冲 GMAW 复合焊工艺参数

试验 序号	激光 功率 /kW	焊接 速度 /(m/min)	送丝 速度 /(m/min)	平均 电流 /A	峰值 电流 /A	基值 电流 /A	脉冲 频率 /Hz	平均 电压 /V
P1	2	1.5	9	150	287.4	85.8	204	21.1
P2	4	1.5	9	150	285.8	81.2	206	21.1
I1	5	0.8	6	100	251.2	48.9	111	18.2
I2	5	0.8	13	200	328.7	115.6	262	23.6
V2	5.5	2.0	15	240	360.3	141.3	277	24.1
V3	5.5	3.0	15	240	366.7	150.4	286	24.1

(a) P2 号试样

(b) V2 号试样

图 1 铝合金复合焊的焊缝成形

2 小孔模型的改进

光纤激光焊接金属时易产生金属蒸汽羽。光谱分析证明,小孔上方是等离子体,孔内是金属蒸汽。在较高辐射照度焊接的条件下,光致等离子体以及金属蒸汽羽生成的金属超微颗粒对激光有散射作用^[11],如图 2 所示,从而对焊缝成形造成影响。因此,需要对基于“线热源-光线追踪”法的小孔模型(适用于低碳钢复合焊)^[4]进一步做出适当的改进。

图 2 小孔中金属蒸汽羽对激光的散射作用

本研究采用的激光功率较大, 而且和钢相比, 铝合金更容易产生金属蒸汽羽或光致等离子体^[11]。所以, 在此考虑了光致等离子体以及金属蒸汽羽产生的金属超微颗粒对激光的散射作用。由于小孔内充满金属蒸汽羽, 激光入射到小孔时, 有一部分被金属蒸汽羽或光致等离子体反射而散失。在大功率激光+脉冲 GMAW 复合焊时, 由于铝合金本身的反射率高, 这一部分反射和铝合金对激光的反射相比可以忽略不计。入射到小孔的激光穿行在金属蒸汽中, 其能量又被金属蒸汽羽吸收一部分。金属蒸汽羽吸收的能量通过辐射和对流传给孔壁, 由此造成的激光能量吸收增加。由于这个过程非常复杂, 而且在此方面的基础研究很少, 很难准确地描述。为了简化起见, 做以下处理: 激光入射到小孔壁的能量一部分通过 Fresnel 吸收, 另一部分由于金属超微颗粒的散射吸收, 并最终通过辐射和传导传给小孔壁。主要通过下式考虑金属蒸汽羽和光致等离子体对激光能量的吸收造成的影响。

$$I_b = \gamma_b I_{(r, \varphi, z)} \quad (1)$$

式中, I_b 为孔壁从金属蒸汽羽和光致等离子体中吸收到的能量, γ_b 为光线入射到小孔壁时金属蒸汽羽和光致等离子体造成的激光能量影响系数, $I_{(r, \varphi, z)}$ 为光线入射到小孔壁局部某处时的激光能量密度。

铝合金大功率激光焊过程中, 小孔壁的蒸发热损失

$$q_{evp} = \sum_{k=1}^n J_k \Delta H_k \quad (2)$$

式中, n 为铝合金焊件中总的合金元素的数量, ΔH_k 为合金元素 k 的蒸发焓, J_k 为合金元素 k 的蒸发率

$$J_k = \frac{44.34}{7.5} a_k p_k^0 \sqrt{\frac{M_k}{T_v}} \quad (3)$$

式中, a_k 为合金元素 k 的活度, M_k 为合金元素 k 的分子量, p_k^0 为达到沸点 T_v 时合金元素 k 的平衡蒸汽压力

$$\lg p_k^0 = -\frac{\Delta_{vap} H_m}{2.303 R T_v} + B \quad (4)$$

式中, $\Delta_{vap} H_m$ 为合金元素 k 的摩尔蒸发焓, R 为摩尔气体常数, B 为积分常数, 对于 Al 取值为 7.5,

对于 Mg 取值为 6.86。在计算过程中, 为了简化计算, 只对主要成分铝和镁等加以考虑, 并取以下参数值^[12]: $a_{Al} = 0.518$, $a_{Mg} = 0.001$ 。

如图 3 所示, 在试件纵截面 (Oxz 面) 内, 考虑到局部小孔壁吸收的能量 $I_a + I_b$ 与通过固体热传导传入焊件内部的能量 q_v 和蒸发热损失 q_{evp} 之间的能量平衡, 按式(5)可以逐点确定小孔前壁和后壁的坐标

$$\tan \theta = \frac{q_v}{I_a + I_b - q_{evp}} \quad (5)$$

式中, q_v 为由局部小孔壁传输到工件内部的热流, I_a 为局部小孔壁吸收的激光能量密度(采用文献[3]介绍的方法确定), q_{evp} 为蒸发热损失。 z 轴方向网格间距为 dz , 首先假定光线在焊件上表面小孔前后壁的倾斜角均为 $\pi/4$, 在考虑 Fresnel 吸收基础上, 重点考虑金属蒸汽羽的影响, 并利用光线追踪法修正激光能量密度 I_a , 再利用能量平衡确定下一 dz 处的小孔前后壁坐标。由此反复迭代计算直到小孔前后壁相交, 输出最终的小孔形状。与不锈钢复合焊^[4]的情况相比, 铝合金大功率激光复合焊接时, 小孔形状计算式(5)中多了一项, 并且 q_{evp} 蒸发热损失的处理也做了改进。

图 3 局部小孔壁能量守恒示意图

3 铝合金复合焊的热源模型标定

对于铝合金激光+脉冲 GMAW 复合焊的热源模型, 仍由来自于激光束、脉冲电弧以及过热熔滴这三部分的热输入构成。对于脉冲 GMAW 电弧和熔滴热焓的作用以及焊缝余高, 处理方式同前^[6-7], 但热物性参数是针对铝合金 6005A 选取的。对于激光热输入部分, 采用峰值指数递增的锥体热源^[4-5]; 但锥体热源的分布参数, 要考虑铝合金复合焊时金属蒸汽羽及光致等离子体的影响, 根据本文的改进小孔模型来标定。

以 P1 和 P2 工艺条件作为算例对小孔进行模拟计算, 图 4 分别比较了基于原模型和本文改进模型计算所得小孔纵截面形状与尺寸。在 P1 和 P2 工艺

条件下,焊接速度和焊接电流不变,激光功率变化。在 P1 条件下激光功率为 2 kW,此时由原模型计算得到的小孔形状明显偏大,小孔深度约为 1.84 mm。图 5a 是由该条件下得到的焊缝横断面宏观照片。可以看出,此时焊缝熔深仅为 1.0 mm 左右,所以原模型小孔深度的计算误差过大。而由改进模型得到的小孔深度约为 1.0 mm,和实际情况比较吻合。此时,激光功率较小,不能忽略光致等离子体和金属蒸汽羽对于激光的反射作用,从而使得熔池表面对于激光的反射率增加,造成工件吸收激光功率的减小。在模型中,这体现在金属蒸汽羽影响系数 γ_b 为负值。在 P2 条件下,激光功率为 4 kW,由原模型计算到的小孔形状又较实际情况偏小。改进模型中金属蒸汽羽影响系数 $\gamma_b \approx 0.35$,可见此时金属蒸汽羽对激光能量的吸收起促进作用。发生这种情况可能的原因是,由于此时激光功率较高,而由光致等离子体和金属蒸汽羽在熔池表面对激光的反射和铝合金本身对激光的反射相比可以忽略,而传入小孔的激光能量由于金属蒸汽羽的散射等,并通过金属蒸汽的传导、对流和热辐射而再传给小孔壁,从而

使得局部小孔壁的吸收能量增加,最终体现在小孔深度的增加,与此同时小孔上表面的宽度几乎不变。观察图 5b 可见, P2 工艺条件下熔深约为 4.2 mm,根据本文改进模型计算的小孔深度约为 3.8 mm,比较接近实际。

(a) P1 号试样

(b) P2 号试样

图 5 复合焊缝横断面宏观照片

在 I1 和 I2 工艺条件下,由于激光功率(5 kW)和焊接速度相同(只是 GMAW 焊接电流改变),小孔形状计算值是相同的。图 6 为 I1 和 I2 条件下改进模型和原模型计算的小孔纵截面形状。在大功率激光(5 kW)作用下,对于铝合金,原有模型所得小孔形状偏小。在改进小孔模型中,此时 $\gamma_b \approx 0.6$ 。金属蒸汽羽将部分激光能量传递到孔壁,所以小孔形状加大,与实际情况更加吻合。在这两种工艺条件下,金属蒸汽羽的影响作用与 P2 条件下相同。可以得知,随着激光功率增加,金属蒸汽羽对激光能量吸收的促进作用也加强了。观察图 7 可见, I1 工艺条件下熔深约为 6.0 mm,根据本文改进模型计算的小

(a) P1 号试样

(b) P2 号试样

图 4 小孔纵截面形状的计算结果

图 6 小孔纵截面形状的改进效果(I1 号试样)

图 7 复合焊缝横断面宏观照片(I1 号试样)

孔深度约为 5.8 mm, 两者比较接近。

在 V2 和 V3 工艺条件下, 只是焊接速度改变, 而激光能量相同, 因此由改进模型和原模型计算得到的小孔形状基本相同, 如图 8 所示。此时金属蒸汽羽影响系数约为 0。这两种工艺条件下, 焊接速度较高, 如 V3 条件下, 焊接速度为 3.0 m/min。焊接速度的提高, 使得焊接热输入减小, 金属蒸汽羽温度低, 对于激光能量吸收变小。此时金属蒸汽羽的影响不是特别重要, 可以忽略不计。V2 工艺条件下, 焊速为 2.0 m/min, 小孔深度为 3.4 mm, 开口半径为 0.581 mm (图 8a)。V3 工艺条件下, 焊速为 3.0 m/min, 小孔深度为 3.0 mm, 开口半径为 0.568 mm (图 8b)。

(a) V2 号试样

(b) V3 号试样

图 8 小孔三维形状的计算结果

综上所述, 可以看出, 改进后的小孔模型可以广泛适用于各种工艺条件下铝合金复合焊接。该模型通过全面描述光线在小孔内的多次反射过程以及孔壁对小孔 Fresnel 吸收以及金属蒸汽羽的影响, 模拟的结果更合理地反映光能密度在小孔壁上的分布特征, 所得小孔形状也更合理。

求出各种工艺条件下的小孔形状和尺寸之后, 就可以利用已知的小孔尺寸来确定激光锥体热源的

分布参数(锥体热源上表面半径 r_e , 下表面半径 r_i , 高度 H)

$$r_e = L_K/2 \quad r_i = r_e/2 \quad H = H_K \quad (6)$$

式中, L_K 是焊件上表面小孔的长度, H_K 是小孔的深度。6 种工艺条件下锥体热源的标定结果见表 3。

表 3 激光锥体热源的标定结果

试验 序号	激光功率 /kW	焊接速度 /(m/min)	上表面半径 /mm	下表面半径 /mm	小孔深度 /mm
P1	2.0	1.5	0.359	0.170	1.0
P2	4.0	1.5	0.453	0.220	3.8
I1	5.0	0.8	0.663	0.331	6.0
I2	5.0	0.8	0.663	0.331	6.0
V2	5.5	2.0	0.581	0.290	3.4
V3	5.5	3.0	0.568	0.284	3.0

4 铝合金复合焊缝成形的预测与验证

根据高强铝合金激光焊的特点, 对小孔模型进行了改进, 首先计算小孔形状, 来确定激光体积热源模型的分布参数。在此基础上, 建立了铝合金激光+脉冲 GMAW 复合焊接的组合式体积热源模型, 计算准稳态条件下铝合金复合焊接温度场。在此基础上, 预测不同工艺条件下的焊缝横断面形状尺寸, 并和试验结果进行比较, 验证模型。图 9 是 3 种典型工艺条件下铝合金复合焊缝成形预测与实测结果的比较。可以看出, 预测结果与试验测试数据吻合良好。

5 结论

(1) 根据铝合金大功率激光+脉冲 GMAW 复合热源焊接工艺过程的特点, 通过对小孔内激光能量吸收与小孔壁蒸发损失加以恰当处理, 对原有小孔模型进行了改进。通过实际焊缝熔深的观测, 发现由改进的小孔模型得到的小孔形状与尺寸更为符合实际。

(2) 改进后的小孔模型提高了小孔形状与尺寸的数值分析精度。利用计算得到的小孔形状和尺寸对激光体积热源分布参数进行了标定, 同时适当处理脉冲 GMAW 热输入和熔滴熔量的分布, 获得了适用于铝合金复合热源焊接的组合式体积热源模型。

(3) 对铝合金激光+脉冲 GMAW 复合焊接焊缝形状尺寸进行了数值分析; 开展了 12 mm 厚铝合金板的复合热源焊接工艺试验, 测试了不同工艺参数下的焊缝形状与尺寸, 验证了所建立的铝合金复合焊缝成形预测模型。

图9 铝合金复合焊缝成形预测与实测结果比较

参 考 文 献

- [1] RASMUSSEN D, BUBOURG L. Hybrid laser-GMAW welding of aluminium alloys: A review [C]// Proc. 7th Int. Conf. on Trends in Welding Research. ASM International, 2006: 163-168.
- [2] KAPLAN A. A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1994, 27: 1805-1814.
- [3] 张转转, 胥国祥, 武传松. 基于小孔形状的 TCS 不锈钢激光+GMAW-P 复合焊热场模型[J]. 金属学报, 2011, 47(11): 1450-1458.
ZHANG Zhuanzhuan, XU Guoxiang, WU Chuansong. Thermal field model for laser+GMAW-P Hybrid welding of TCS stainless steel based on the predicted keyhole shape[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(11): 1450-1458.
- [4] CHO J H, NA S J. Implementation of real-time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in

keyhole[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2006, 39: 5372-5378.

- [5] 胥国祥, 武传松, 秦国梁, 等. 激光+GMAW 电弧复合热源焊接焊缝成形的数值模拟 I. 表征激光作用的体积热源作用模式[J]. 金属学报, 2008, 44(4): 478-482.
XU Guoxiang, WU Chuansong, QIN Guoliang, et al. Numerical simulation of weld formation in laser+GMAW hybrid welding I volumetric distribution mode describing thermal action[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(4): 478-482.
- [6] 胥国祥, 武传松, 秦国梁, 等. 激光+GMAW 电弧复合热源焊接焊缝成形的数值模拟 II. 组合式体积热源的作用模型[J]. 金属学报, 2008, 44(6): 641-646.
XU Guoxiang, WU Chuansong, QIN Guoliang, et al. Numerical simulation of weld formation in laser+GMAW hybrid welding II combined volumetric distribution mode of hybrid welding heat source[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(6): 641-646.
- [7] 胥国祥, 武传松, 秦国梁, 等. 激光+GMAW 电弧复合热源焊接焊缝成形的数值模拟 III. 电弧脉冲作用的处理与热源模型的改进[J]. 金属学报, 2009, 45(1): 113-118.
XU Guoxiang, WU Chuansong, QIN Guoliang, et al. Numerical simulation of weld formation in laser+GMAW hybrid welding III treatment of pulsed arc action and improvement of heat source modes[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(1): 113-118.
- [8] MAJRL E A, BEYER E. Hybrid laser beam welding-classification, characteristics and application[J]. Journal of Laser Applications, 2006, 18: 169-180.
- [9] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laser hybrid welding [J]. Journal of Laser Application, 2005, 17: 2-14.
- [10] 陈彦斌, 曹丽杰. 铝合金激光焊研究现状[J]. 焊接, 2001(3): 9-12.
CHEN Yanbin, CAO Lijie. Present situation of laser welding of aluminium alloys[J]. Welding & Joining, 2001(3): 9-12.
- [11] 陈武柱. 激光焊接与切割质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
CHEN Wuzhu. Quality control of laser welding and cutting [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [12] 王嵩, 陶冬平, 杨红卫. 二元液态合金体系组元活度的热力学一致性检测[J]. 昆明理工大学学报, 2008, 33(3): 15-19.
WANG Song, TAO Dongping, YANG Hongwei. Verification of thermodynamic consistency of component activity data of binary liquid alloys[J]. Journal of Kunming University of Technology, 2008, 33(3): 15-19.

作者简介: 张维明, 男, 1986 年出生。主要研究方向为激光复合焊接的数值模拟。

E-mail: weimingzhang001@126.com

武传松(通信作者), 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高效焊接过程模拟与测控。

E-mail: wucs@sdu.edu.cn