

文章编号: 0258-7025(2009)12-3167-07

低功率 YAG 激光-熔化极气体弧焊复合焊接 电弧等离子体行为研究

刘黎明 黄瑞生 曹运明

(大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要 采用高速摄像机、电流电压采集仪及光谱分析仪分别研究低功率 YAG 激光-熔化极气体弧焊(GMAW)复合焊接过程中的电弧形态、电压特点及局部电子温度、密度变化。在此基础上,运用等离子体热力学平衡理论分析复合焊接电弧等离子体的行为特征。试验表明,低功率 YAG 激光吸引、压缩 GMAW 电弧,提高电弧局部区域的电子温度至 (15400 ± 900) K,电子密度至 $(1.265 \pm 0.101) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,降低了 GMAW 热源输出电压,促进了焊接电弧等离子体局部热力学平衡(LTE)的建立。

关键词 激光技术;激光复合焊接;电弧等离子体;发射光谱;电子温度与电子密度;局部热力学平衡

中图分类号 TG456.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093612.3167

Behavior Analysis of Low Power YAG Laser-Gas Metal Arc Welding Hybrid Welding Arc Plasma

Liu Liming Huang Ruisheng Cao Yunming

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian,
Liaoning 116024, China)

Abstract Behavior of welding arc plasma, characteristic of welding voltage, local changes of electron temperature and electron density were investigated respectively with high speed camera, inductance gauge of current and voltage, spectrometer in low power YAG laser-gas metal arc welding (GMAW) hybrid welding process comparing with simple GMAW welding case. Based on the experimental results, behaviors of hybrid welding arc plasma were explained by plasma theory of thermodynamic equilibrium. The results indicated that, due to the input of YAG laser, the GMAW arc was attracted and constricted, electron temperature and electron density of local arc were increased to (15400 ± 900) K and $(1.265 \pm 0.101) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, the voltage output of GMAW source was decreased, and the formation of local thermodynamic equilibrium (LTE) of hybrid welding arc plasma was accelerated.

Key words laser technique; laser hybrid welding; arc plasma; emission spectrum; electron temperature and electron density; local thermodynamic equilibrium

1 引 言

激光-电弧复合焊接技术首先由 W. M. Steen 等^[1]于 1979 年提出。与单一激光、电弧焊相比,复合焊接不仅能发挥各自优势,同时具有提高速度、增加熔深、稳定焊接过程、降低装配条件等焊接效果^[2~4]。随着工业生产的发展,激光-电弧复合焊接技术逐步得到各国焊接界的广泛重视。多年的激

光-电弧复合热源焊接基础研究证明了复合焊接热源的优势和工业生产应用的可行性。最近几年,该新兴焊接技术已在德国等发达国家的造船、汽车制造行业先后进入了工业化应用阶段^[5, 6]。

目前,激光-电弧复合焊接的研究主要集中在激光-惰性气体钨极弧焊(GTAW)、激光-熔化极气体弧焊(GMAW)复合焊接工艺参数的影响及将复合

收稿日期: 2008-12-18; 收到修改稿日期: 2009-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(50675028)资助项目。

作者简介: 刘黎明(1967—),男,教授,博士生导师。主要从事轻合金先进连接技术及其机理以及焊接自动化等方面的研究。E-mail: liulm@dlut.edu.cn

焊接应用于不同材料的焊接中^[7, 8]。激光-电弧复合焊接过程是一个高度复杂的物理化学过程。由于激光与电弧相互作用的复杂性及测试手段的有限性,多年来激光与电弧相互耦合及影响的物理机制研究领域人们较少问津,但仍取得了一定的结果。激光的加入,在激光作用点处形成的等离子体为电弧提供导电通道,使电弧电导率增大、电阻下降,电流密度集中,电弧吸附、压缩于激光与材料作用点,稳定了电弧斑点,这不仅增加了熔深,而且有利于稳定电弧^[1, 2, 9~14]。电弧对金属的预热作用,降低了金属对激光的反射,提高了金属对激光能量的吸收率,随着金属温度的升高,金属对激光的吸收率提高,电弧的预热作用降低了激光增强电弧的阈值能量^[15~17];同时,电弧稀释了激光在激光与材料作用点处形成的高温高密度激光等离子体,降低了等离子体对激光能量的吸收、反射和散射,从而提高了激光能量的利用率^[18~22]。

每一种复合焊接方法都是一个非常复杂的非线性系统,要想彻底了解激光与电弧的相互作用情况仍很困难,因此应针对不同的复合焊接方法进行更深入细致的研究。本文针对低碳钢深入开展了低功率脉冲 YAG 激光-直流脉冲 GMAW 复合焊接研究,实时监测复合焊接过程电流电压、电弧行为及发射光谱的变化规律,同时利用谱线斯塔克(Stark)效应及玻尔兹曼(Boltzmann)分布图法分别估算了电弧局部电子密度及温度;在此基础上,结合复合焊接过程电弧等离子体行为特征,运用等离子体理论分析了低功率激光-电弧复合焊接等离子体的行为特征。

2 试验设置及估算原理

2.1 试验设备与设置

焊接试验过程及分析仪器分布如图 1 所示。试验使用 LWS-500 型 YAG 脉冲激光器旁轴复合 YD-350AG1 型 GMAW 焊机(直流反接),在尺寸为 300 mm×120 mm×8 mm 的 Q235B 钢板上进行平板堆焊。试验约定,在同一焊道上,前半部分为 YAG 激光-GMAW 复合焊接,后半部分为单独 GMAW 焊接。焊前用丙酮清洗去除钢板表面油脂,干燥后分别用砂布和钢刷去除其表面氧化膜,使表面状态一致。ER50-6 焊丝直径为 1.2 mm。焊接保护气体为体积分数 80% 的 Ar 和体积分数 20% 的 CO₂,从焊枪喷嘴流出。试验过程中,除特定参数外,如未有特殊说明,则采用统一焊接参数,如表 1 所示。

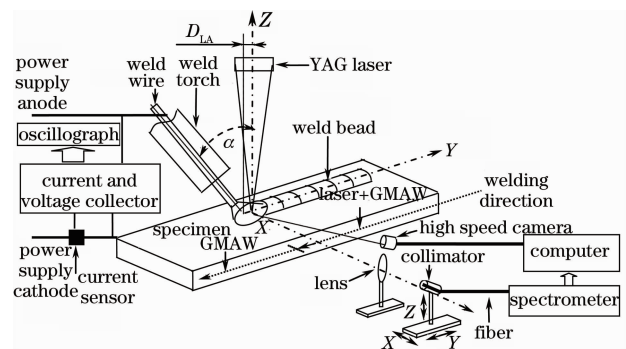


图 1 复合焊接过程及分析仪器分布示意图

Fig. 1 Schematic drawing of hybrid welding and analytical instruments

表 1 焊接参数

Table 1 Welding parameters

Welding parameters	Values
Average laser power P /W	200
Lens focus f /mm	120
Defocusing amount Δz /mm	0
Laser pulse width /ms	3
Laser pulse frequency /Hz	31
Laser beam diameter /mm	0.5
GMAW peak current /A	425
GMAW base current /A	40
GMAW current pulse width /ms	3
GMAW current frequency /Hz	186
GMAW average voltage U /V	31
Welding wire speed /(m/min)	8
Flow rate of shielding gas /(L/min)	15
Welding speed v /(m/min)	0.8
Laser-arc distance D_{LA} /mm	0
Angle of welding torch α /($^{\circ}$)	40

使用电流、电压采集仪实时传感焊接电流、电压;使用 TDS 1002 型数字存储示波器显示、存储波形信号。使用垂直放置于焊接方向的采样频率为 1072 frame/s 的 CPL 250 K CMOS 型高速摄像机对电弧形态变化进行实时拍摄。使用垂直放置于焊接方向的固定在三维运动瞄准仪上的光纤探头,采集透过焦距为 500.0 mm 的 GLA4782 型石英平凸透镜的电弧发射光谱。使用经 LHM254 型汞灯光源定标的可观测范围为 200~1000 nm 的 SP-2556 型光谱仪分析、记录电弧光谱。其相关设置为:谱线记录范围 232.0~272.0 nm,光栅 1200 g/mm,分辨率 0.0318 nm,CCD 图像分辨率 1340 pixel×400 pixel。通过直流脉冲电压上升沿触发控制脉冲信号,该脉冲信号触发激光器输出的 Q 开关而输出激光,并同步触发高速摄像机而记录电弧行为变化,同时该脉冲信号延时 0.5 ms 触发 SP-2556 型光谱

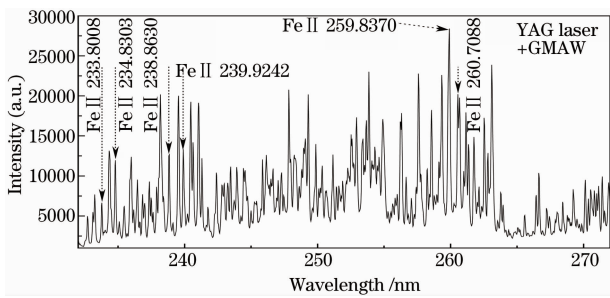


图 2 232.0~272.0 nm 范围的 YAG 激光-复合焊接电弧等离子体光谱

Fig. 2 Arc plasma spectrum between 232 nm and 272 nm captured in YAG laser-GMAW hybrid welding process
仪而记录电弧发射光谱。焊接试验条件下所采集的

波长范围为 232.0~272.0 nm 的等离子体光谱,如图 2 所示。

2.2 电弧等离子体电子温度、密度估算

当焊接电弧等离子体某局部区域的电子密度足够大,满足式(1)的条件时,则该区域处于局部热力学平衡状态(LTE)^[23,24]

$$N_e \geq 1.6 \times 10^{12} \cdot T_e^{\frac{1}{2}} \cdot (\Delta E)^3, \quad (1)$$

式中 N_e 为电子密度, T_e 为电子温度, $\Delta E = E_m - E_n$ 为上能级 m 能量 E_m 与下能级 n 能量 E_n 之间差值的最大值。

当测量的发射谱线光学厚度满足(2)式的条件时,则发射谱线是光学薄的^[25,26]。

$$\tau_{nm}(\lambda) = K_{nm}(\lambda) \cdot L = \frac{e^2}{2\epsilon_0 m_e c} f_{nm} N_n \left(1 - \frac{N_m g_n}{N_n g_m}\right) \cdot \frac{1}{\Delta\lambda_{1/2}} \cdot L \ll 1, \quad (2)$$

式中 $\tau_{nm}(\lambda)$ 为谱线光学厚度, $K_{nm}(\lambda)$ 为光学吸收系数, L 为等离子体厚度, λ 为由上能级 m 向下能级 n 跃迁产生的波长, e 为电子电荷, m_e 为电子质量, ϵ_0 为真空介电常数, c 为光速, f_{nm} 为振子强度, N_m 与 N_n 分别为同种原子或离子处于能级 m 与能级 n 的粒子密度, g_m 与 g_n 分别为能级 m 与能级 n 的统计权重, $\Delta\lambda_{1/2}$ 为谱线半峰全宽(FWHM)。当不考虑受激发射对电弧等离子体吸收的影响时,有 $N_m g_n / (N_n g_m) \ll 1$ 。

当焊接电弧满足局部热力学平衡及光学薄假设时,可以通过 Boltzmann 分布图法估算电子温度^[27]

$$\ln \{ I_{m(i)} \lambda_{m(i)} / [g_{m(i)} A_{m(i)}] \} = -E_{m(i)} / (kT_e) + C, \quad (3)$$

式中 $I_{m(i)}$ 及 $A_{m(i)}$ 分别为上能级向下能级跃迁的谱线强度及跃迁几率, k 为 Boltzmann 常数, C 为常数。根据(3)式,以 $\ln \{ I_{m(i)} \lambda_{m(i)} / [g_{m(i)} A_{m(i)}] \}$ 为变量,以 $E_{m(i)}$ 为自变量,对同一元素相同离化态的多条谱线就可以拟合得到一个直线关系,其斜率为 $-1/(kT_e)$, 如此便可计算得到电子温度。

对焊接电弧等离子体而言,电弧中的辐射粒子处于电子及离子包围中,则由带电粒子的长程库仑力作用所决定的斯塔克谱线展宽效应占优势(多普勒效应可以忽略)。同时,根据斯塔克谱线展宽理论,对中性原子和其一次电离的离子的孤立谱线而言,其谱线加宽主要是由电子碰撞引起的,而粒子准静态库仑场对谱线的展宽效应的贡献很小。因此焊接电弧等离子体的电子密度估算可通过简化式得出^[24,27]

$$N_e = 10^{16} \cdot \Delta\lambda_{1/2}^5 / (2\tau\omega), \quad (4)$$

式中 $\Delta\lambda_{1/2}^5$ 为 Stark 效应引起的谱线半峰全宽, ω 为电子碰撞半宽度。由于谱线 Stark 加宽主要谱线线形为洛伦兹(Lorentzian)型,为分析谱线半峰全宽,本文运用 Lorentzian 函数拟合观察到的谱线。

3 试验结果及分析

3.1 焊接电弧行为

前期试验研究了激光功率、离焦量、光丝间距等参数对电弧形态、焊缝熔深的影响^[28],试验结果如图 3 所示。结果表明,在上述焊接参数条件下,低功率 YAG 激光-GMAW 复合焊接熔深(3.2 mm)大于单 GMAW 焊接熔深(2 mm),复合焊接熔深增加 60%,复合焊缝根部呈现钉尖状,说明该激光功率下的焊接试验能实现深熔焊,形成了匙孔,而匙孔的深度受到低激光功率的限制而较浅。

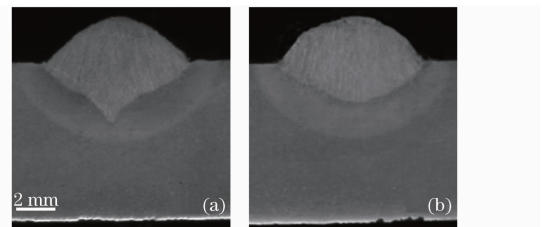


图 3 堆焊焊缝横截面对比。(a)复合焊接;
(b)GMAW 焊接

Fig. 3 Cross section comparison of the bead-on-plate weld. (a) Hybrid welding; (b) GMAW welding

同时,试验研究发现激光吸引、压缩电弧。高速摄像机拍摄的、电弧稳定燃烧状态下(脉冲 GMAW

电弧电压处于峰值区域)的 YAG 激光-GMAW 复合焊接电弧及单独 GMAW 焊接电弧,其形态如图 4 所示。对比电弧外观轮廓可以知道,复合焊接电弧被吸引到激光与材料的作用点上(匙孔上方),电弧根部及临近区域(如 A 点附近区域)被强烈压缩导致横截面明显减小,如图 4(a) 所示;远离激光作用点处的复合电弧(如中部 B 点附近及中上区域)的横截面变化不大,表现出 GMAW 焊接电弧的特点,如图 4(b) 所示。

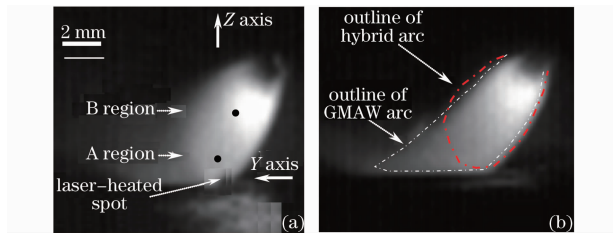


图 4 电弧稳定燃烧状态下的复合焊接电弧(a)及 GMAW 电弧(b)形态对比

Fig. 4 Arc behavior contrast between hybrid (a) and GMAW (b) welding when arc burns

在单独 GMAW 焊接过程中,熔池表面阴极区电弧温度受到钢铁蒸气温度(约 3000 K)的限制,其温度略高于钢铁蒸气温度,如 4000 K;而在低功率 YAG 激光脉冲焊接过程中,匙孔中喷射出来的等离子体羽辉温度可达 8000 K^[29]。虽然匙孔上方(约 1.5 mm)羽辉温度迅速降低(5000 K)^[30],但是,匙孔内部温度必将高于其喷射出来的羽辉温度。因此,在 YAG 激光-GMAW 复合焊接过程中,由于匙孔强烈吸收激光能量,形成的高温等离子体羽辉从匙孔中不断溢出。高温等离子体羽辉的存在改变了电弧阴极特性,使该区域的电弧温度急剧升高。通过 Spitzer^[15] 给出的等离子体电阻率公式

$$\eta = \frac{\pi e^2 m_e^{1/2}}{(4\pi\epsilon_0)^2 (kT_e)^{3/2}} \ln \Lambda, \quad (5)$$

式中 $\ln \Lambda$ 为库仑对数。在匙孔上方激光作用点区域,复合电弧与 GMAW 电弧的电阻率之比为: $\eta_{\text{Hybrid}}/\eta_{\text{GMAW}} = T_{\text{e-GMAW}}/T_{\text{e-Hybrid}} = (4000/8000)^{3/2} = 0.353$ 。因此,激光的加入,降低了激光作用点区域的电阻,从而增加了电弧经过该路径时的电导率。根据电弧最小电压原理,电弧被吸引到匙孔处。同时,匙孔附近的高温等离子体羽辉为电弧提供了一个非常稳定的阴极斑点,同样促使电弧偏向匙孔。匙孔上方形成的高温等离子体羽辉通道为电弧提供了具有更高电导率的导电通路,但是,由于该导电通道狭窄,所以近熔池表面的电弧被压缩到匙孔附近,

电弧体积减小。以上因素最终导致了复合焊接电弧在弧根及临近区域被强烈吸引及压缩。而对远离激光作用点的复合焊接电弧而言,如 B 点附近及近焊丝部分的电弧区域,其受激光的影响很小,电弧特性改变不大,表现出单独 GMAW 焊接电弧的特点,故其横截面变化不大。

3.2 焊接电弧电子温度、电子密度

焊接试验中,光纤探头对准激光作用点上方的 A 点区域(距离试板表面 1 mm)及远离激光作用点的 B 点区域(距离试板表面 3 mm),如图 4(a) 所示,分别采集这 2 个局部区域的电弧光谱。对比采集的波长范围为 232.0~272.0 nm 的 YAG 激光-GMAW 复合焊接电弧光谱及单独 GMAW 焊接电弧光谱,发现其线状谱是一致的,如图 2 所示。在前期复合焊接电弧光谱测量、电子温度及密度估算研究的基础上^[31],选取 Fe 元素相同离化态的多条发射谱线: FeII233.8008 nm, FeII234.8303 nm, FeII238.863 nm, FeII239.9242 nm, FeII259.8370 nm 及 FeII260.7088 nm。根据(3)式,运用 Boltzmann 分布图法估算电弧电子温度,相关参数可参考 NIST 数据库^[32],对谱线 FeII238.863 nm 进行 Lorentzian 拟合并测量其半峰全宽,根据(4)式估算电弧电子密度, ω 统一取 $0.0044 \text{ nm}^{[33]}$ 。

图 5(a) 为根据上述方法得到的 A 点区域典型 Boltzmann 图,图 5(b) 为根据 Boltzmann 图法计算所得的焊接电弧 A, B 点区域的电子温度变化趋势。结果表明,如图 5(b) 所示,低功率 YAG 激光-GMAW 复合焊接电弧弧根压缩区域(A 点区域)的电子温度高于单 GMAW 焊接电弧相同区域的电子温度,即 $T_{\text{e-Hybrid}} = (15400 \pm 900) \text{ K} > T_{\text{e-GMAW}} = (11200 \pm 700) \text{ K}$;而远离激光作用点的复合电弧区域(B 点区域)的电子温度变化与单 GMAW 焊接电弧相同区域的电子温度相差不大,均约为 $(17500 \pm 1000) \text{ K}$ 。

由于复合焊接电弧在弧根及临近区域被强烈吸引及压缩,同时该区域的电子温度高于单 GMAW 焊接电弧相同区域的电子温度,因此,只针对焊接电弧 A 点区域的电子密度进行分析。图 6(a) 为谱线 FeII238.863 nm 的 Lorentzian 拟合图,图 6(b) 为计算所得的焊接电弧 A 点区域的电子密度变化趋势。结果表明,如图 6(b) 所示,低功率 YAG 激光-GMAW 复合焊接电弧弧根压缩区域(A 点区域)的电子密度高于单 GMAW 焊接电弧相同区域的电子密度,即 $N_{\text{e-Hybrid}} = (1.265 \pm 0.101) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} > N_{\text{e-GMAW}} = (1.043 \pm 0.083) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

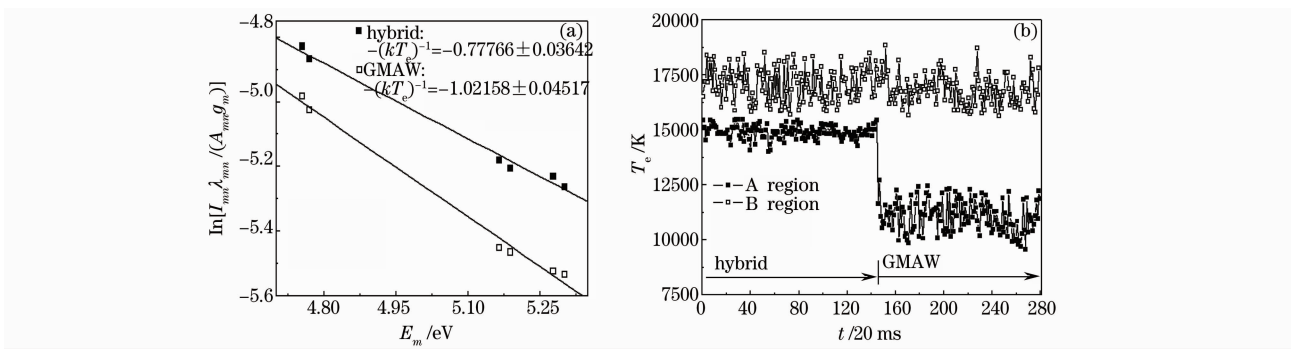


图 5 焊接电弧区域电子温度估算。(a) A 区典型 Boltzmann 图；(b) 焊接过程中 A, B 区电子温度的变化
Fig. 5 Electron temperature measurement of welding arc. (a) Typical Boltzmann plot for selected FeII emission lines at the A region; (b) variation of electron temperature during welding process at the regions of A and B

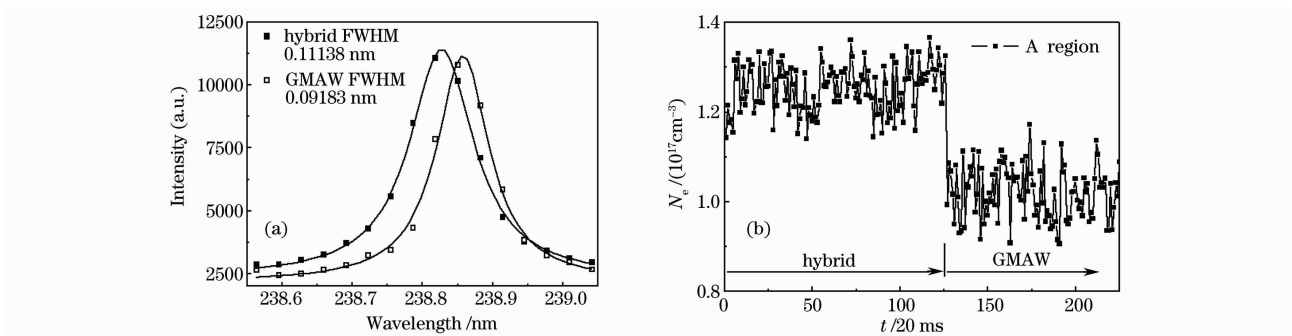


图 6 焊接电弧 A 区电子密度估算。(a) 谱线 FeII238.863 nm 的 Lorentzian 拟合图；(b) 焊接过程 A 区电子密度变化
Fig. 6 Electron density measurement of welding arc at the A region. (a) Lorentzian fitting of the Stark broadened profile for FeII 238.863 nm; (b) variation of electron density during welding process at the A region

因此,在低功率 YAG 激光-GMAW 复合焊接过程中,激光作用点上方的电弧弧根及临近的压缩区域的电子温度、密度高于单 GMAW 焊接电弧相同区域的电子温度、密度。从匙孔中喷射出来的高温等离子体羽辉,其内部包含的大量自由电子改变了电弧阴极电子发射方式,从而改变电弧弧根特性,使电弧弧根及临近的区域被吸引并压缩。该宏观压缩作用提高了电弧的电子密度。由于电子质量远小于离子及中性原子的质量,处在激光辐照区的从匙孔中不断溢出的自由电子及电弧本身包含的自由电子,由于吸收激光能量而被快速加速,电子热运动速度获得很大的提高,获得足够能量的自由电子通过碰撞将能量传递出去,同时使金属蒸气和周围气体电离,提高了激光辐照区及其附近区域的电离度,则电子温度、电子密度获得提高。从匙孔中不断溢出的等离子体羽辉不仅包含大量的自由电子,同时包含大量的具有较低电离能的金属原子,金属原子在激光照射作用下及电弧热作用下由于温度迅速升高而大量电离,使电子密度获得提高。上述因素导致了激光作用点上复合焊接电弧等离子体电子温度、电子密度局部升高现象的产生。

由上述电弧局部区域电子温度估算结果知道,其电子温度均低于 30000 K,同时估算所采用的 FeII233.8008 nm 谱线的上、下能级能量差值 $\Delta E = 5.301359 \text{ eV}^{[32]}$,则根据公式(1)估算所得的焊接电弧等离子体处于局部热力学平衡状态的最低电子密度阈值为 $4.1289 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。电弧局部区域电子密度估算结果表明,电弧局部电子密度均高于 $9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。因此实验条件下的复合焊接电弧及 GMAW 焊接电弧较好地满足局部热力学平衡状态条件。根据公式(2)计算选取的 6 条发射谱线的光学厚度,均发现 $\tau_{nm}(\lambda) < 0.04$ (FeII233.8008 nm 为 0.0293, FeII234.8303 nm 为 0.0262, FeII238.8630 nm 为 0.0232, FeII239.9242 nm 为 0.0255, FeII259.8370 nm 为 0.0379, FeII260.7088 nm 为 0.0306),因此谱线的自吸收可忽略,复合焊接及 GMAW 焊接电弧等离子体可认为是光学薄的。

3.3 焊接电弧电压

焊接过程中实时采集的低功率 YAG 激光-GMAW 复合焊接电流、电压及 GMAW 焊接电流、电压如图 7 所示。结果表明,当 GMAW 焊机设定的输出基值、峰值电流一定时,复合焊接基值、峰值

电压均分别小于 GMAW 焊接电压基值、峰值。

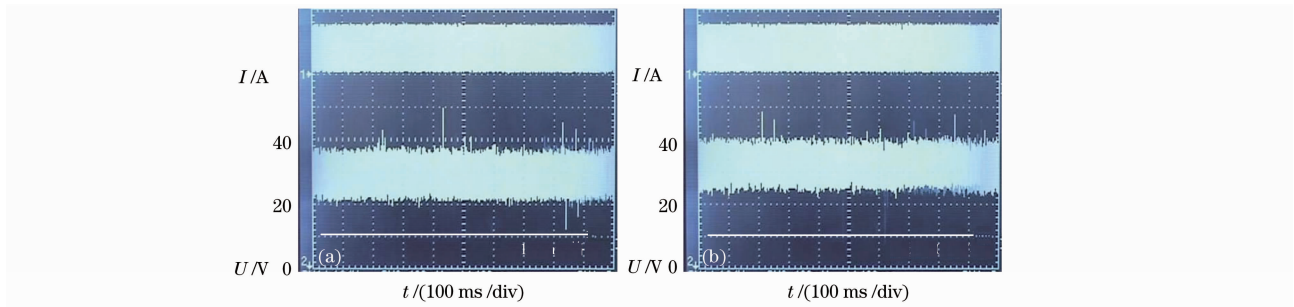


图 7 焊接电流、电压。(a) 复合焊接；(b) GMAW 焊接

Fig. 7 Voltage and current of welding. (a) Hybrid welding; (b) GMAW welding

与 GMAW 焊接过程对比,在低功率 YAG 激光-GMAW 复合焊接过程中,匙孔为焊接电弧提供了大量的自由电子,不仅改变了电弧阴极电子产生方式,同时提高了电导率。因此降低了电弧阴极电场强度。匙孔中不断溢出的进入弧柱中的大量具有较低电离能的金属蒸气,由于更容易电离的原因而提高了弧柱的电导率,同样降低了激光作用点上方电弧弧柱区域的电场强度 E_k ; 而电弧中、上部区域及阳极区域,受到激光作用影响较小,其电场强度 E_d 及 E_a 改变不大。当电弧阴极(k)、弧柱、阳极(a)长度不变时,焊接电压可计算为

$$U = E_k r_k + E_u r_u + E_d r_d + E_a r_a, \quad (6)$$

式中 U 为电压, E 为电场强度, r 为弧长。则在复合焊接过程中,由于激光的加入而引起的阴极、近阴极弧柱压缩区的电场强度减小,均降低了 GMAW 热源输出的基值、峰值电压。

3.4 激光与电弧作用

在电弧等离子体理论计算模型中,当焊接电弧等离子体某局部区域电子密度足够大时,该局部区域处于热力学平衡状态^[23, 24]。而对实际焊接电弧等离子体而言,由于电弧等离子体与周围环境存在能量、动量、质量迁移过程,系统整体就已处于不平衡状态,同时电场能量主要传递给电子,然后通过碰撞再传递给重粒子(离子及中性粒子),因此电弧等离子体各区域达不到绝对的局部热力学平衡。只有电弧等离子体弛豫长度、弛豫时间足够小,在等离子体粒子碰撞之间的自由程上偏离平衡态不大时,可以认为电弧等离子体中(特别是弧柱区)每一局部区域的电子温度与重粒子温度彼此相近,也就是说,电弧等离子体中的条件接近于局部热力学平衡条件(等离子体是准等温的)。如此,可以估量促进电弧等离子体局部热力学平衡建立的条件^[34, 35]。当电子获得的电场能量通过弹性碰撞(不考虑非弹性碰

撞)全部传给重粒子时^[35]

$$\sigma E^2 = 3k(T_e - T_g)\delta\nu_{eg}N_e/2, \quad (7)$$

式中 $\sigma = e^2\lambda_e N_e/(m_e V_e)$ 为等离子体电导率, $\lambda_e = (\sum_x N_x Q_{ex})^{-1}$ 为电子在气体中的自由程, N_x 为等离子体各组分浓度, Q_{ex} 为碰撞截面, V_e 为电子热运动速度, E 为电场强度, T_g 为重粒子温度, $\delta = 2m_e/m_g$ 为电子弹性碰撞传出的那部分能量, m_g 为重粒子质量, $\nu_{eg} = V_e/\lambda_e$ 为电子与重粒子的碰撞频率。由(7)式推导可得

$$\frac{T_e - T_g}{T_e} = \frac{3\pi}{32} \cdot \frac{m_g}{m_e} \cdot \left(\frac{\lambda_e e E}{3kT_e/2} \right)^2, \quad (8)$$

式中括号内式子意义为电子获得的电场能量与其热运动动能之比。可以看出,降低电子获得的电场能量和提高电子热运动动能均有利于电弧等离子体局部热力学平衡的建立。

根据上述对低功率 YAG 激光-GMAW 复合焊接过程中的电弧形态特征、电压特点及局部电子温度、密度变化的研究结果,可以知道,激光吸引电弧、强烈压缩电弧根部及临近区域,减少了该区域电弧等离子体和周围介质之间的接触换热,同时提高了等离子体粒子间的弹性和非弹性碰撞次数;匙孔的形成及从中不断溢出的进入弧柱中的大量具有较低电离能的金属蒸气,降低了由电弧热源供给能量的电场强度(特别是阴极、电弧根部与临近压缩区域),从而降低了电子所获得的电场能量;激光辐照区的等离子体吸收激光能量,提高了相近区域的电子温度及电子密度(特别是电弧根部与临近压缩区域),从而不仅提高了电子的热运动动能,而且提高了使电弧等离子体体积内部温度和粒子浓度趋于平衡的输运系数(热导系数、扩散系数、电导率)。因此,低功率 YAG 激光的加入,有利于促进焊接电弧等离子体局部热力学平衡态的更快建立。

4 结 论

1) 低功率 YAG 激光的加入, 会吸引熔化极气体弧焊电弧、强烈压缩电弧根部及临近区域, 提高压缩区域的电子温度至 (15400 ± 900) K, 电子密度至 $(1.265 \pm 0.101) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 同时降低熔化极气体弧焊热源输出电压。

2) 低功率 YAG 激光的加入促使电弧等离子体中的热力学条件更接近于局部热力学平衡条件, 促进焊接电弧等离子体局部热力学平衡态的更快的建立。

参 考 文 献

- W. M. Steen, M. Eboo. Arc augmented laser welding[J]. *Metal Construction*, 1979, **11**(6): 332~333, 335
- W. M. Steen. Arc augmented laser processing of materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(11): 5636~5641
- Chen Yanbin, Xu Qinghong, Su Yandong. Welding application of combined laser-coaxial arc heat source[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1995, **16**(4): 239~243
陈彦斌, 徐庆鸿, 苏彦东. 激光-同轴电弧复合焊接热源焊接[J]. *焊接学报*, 1995, **16**(4): 239~243
- U. Oilthey, A. Wieschemann. Prospects by combing and coupling laser beam and arc welding process[J]. *IIW Doc.*, 1999, X11-1556-99: 1~6
- T. Graf, H. Stauffer. Laser-hybrid welding drives VW improvements[J]. *Weld. J.*, 2003, **82**(1): 42~48
- Jasnau Ulf, Hoffmann Jan, Seyffarth Peter. Nd: YAG-laser-GMA-hybrid welding in shipbuilding and steel construction[J]. *Rob. Weld. Intell. Autom.*, 2004, **299**: 14~24
- G. L. Qin, Z. Lei, S. Y. Lin. Effects of Nd: YAG laser + pulsed MAG arc hybrid welding parameters on its weld shape[J]. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 2007, **12**(1): 79~86
- G. Casalino. Statistical analysis of MIG-laser CO₂ hybrid welding of Al-Mg alloy [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, **191**(1-3): 106~110
- V. V. Avilov, I. Decker, H. Pursch *et al.*. Study of a laser-enhanced welding arc using advanced split anode technique[J]. *Weld. J.*, 1994, **11**(2): 112~123
- C. E. Albright, J. Eastman, W. Lempert. Low-power lasers assist arc welding[J]. *Weld. J.*, 2001, **80**(4): 55~58
- G. den Ouden, B. Hu. Physical aspect of laser assisted arc welding[C]. *Proc of the 7th Int Symp JWS, Kobe*, 2001: 69~76
- Moriaki Ono, Yukio Shinbo, Akihide Yoshitake *et al.*. Development of laser-arc hybrid welding [J]. *NKK Technol. Rev.*, 2002, (86): 8~12
- Liu, Liming, Wang Jifeng, Song Gang. Hybrid laser-arc welding of AZ31B Mg alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1523~1526
刘黎明, 王继峰, 宋 刚. 激光电弧复合焊接 AZ31B 镁合金[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1523~1526
- B. W. Shinn, D. F. Farson, P. E. Denney. Laser stabilization of arc cathode spots in titanium welding[J]. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 2005, **10**(4): 475~481
- F. F. Chen. Introduction to Plasma Physics[M]. New York: Plenum Press, 1974, **160**: 279~318
- Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Interaction Physics Between Laser and Materials[M]. Beijing: China Machine Press, 1996. 87~136
- 陆 建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 87~136
- J. Paulini, G. Simon. A theoretical lower limit for laser power in laser-enhanced arc welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1993, **26**(9): 1523~1527
- S. S. Hu, S. B. Zhang, D. P. Lu *et al.*. A study of arc augmented laser welding [J]. *IIW Doc.*, 1991, XII-1267-91: 207~213
- Hu Shengsun, Zhang Shaobin, Zhao Jiarui. Arc augmented laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1993, **14**(3): 159~163
胡绳荪, 张绍彬, 赵家瑞. 电弧强化激光焊 [J]. *焊接学报*, 1993, **14**(3): 159~163
- D. P. Lu, S. B. Zhang, S. S. Hu *et al.*. Study on mechanism of mutual effect between laser and arc & its effect on weld penetration [J]. *Chin. Weld.*, 1993, **2**(2): 104~108
- W. Phillip, Fuerschbach. Laser assisted plasma arc welding [C]. *Section D-ICALEO*, 1999: 102~109
- Chen Yanbin, Li Liqun, Wu Lin. Quantitative measurement of absorption and defocusing of laser beam by electric arc [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, **24**(3): 56~58
陈彦宾, 李俐群, 吴 林. 电弧对激光吸收与散焦的定量测量 [J]. *焊接学报*, 2003, **24**(3): 56~58
- H. R. Griem. Plasma Spectroscopy [M]. New York: MCG Raw-Hill, 1964. 267~312
- H. R. Griem. Spectral Line Broadening by Plasma [M]. New York: Academic, 1974. 226~231
- A. Corney. Atomic and Laser Spectroscopy [M]. Oxford, Oxford University Press, 1977. 271~288
- A. P. Thorne. Spectrophysics [M]. London: Chapman and Hall, 1988. 286~316
- B. George. Principles of Laser Plasmas [M]. New York: Wiley, 1976. 552~604
- R. S. Huang, L. M. Liu, F. Zhang. Influences of laser in low power YAG laser-MAG hybrid welding process [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 47~50
- J. Sabbaghzadeh, S. Dadras, M. J. Torkamany. Comparison of pulsed Nd: YAG laser welding qualitative features with plasma plume thermal characteristics [J]. *J Phys D: Appl. Phys.*, 2007, **40**: 1047~1051
- D. Lacroix, G. Jeandel. Spectroscopic characterization of laser-induced plasma created during welding with a pulsed Nd: YAG laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **81**(10): 6599~6606
- L. M. Liu, R. S. Huang, G. Song *et al.*. Behavior and spectrum analysis of welding arc in low power YAG laser-MAG hybrid welding process [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2008, **36**(4): 1937~1943
- NIST Atomic Spectra Database: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/index.html>
- N. Konjevic', A. Lesage, J. R. Fuhra *et al.*. Experimental stark widths and shifts for spectral lines of neutral and ionized atoms [J]. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2002, **31**(3): 873
- M. F. Rukov, A. C. Koroteev, B. A. Wriokov. (Edited by Zhao Wenhua, Zhou Lixing). Applied Dynamics of High Temperature Plasma: Physics Process of Arc Plasma Generator [M]. Beijing: Science Press, 1981. 1~5
M. F. 茹科夫, A. C. 科罗捷耶夫, B. A. 乌柳科夫 著. 赵文华, 周力行 译. 热等离子体实用动力学: 电弧等离子发生器的物理过程 [M]. 北京: 科学出版社, 1981. 1~5
- C. B. Dresven. (Edited by Tang Fulin, Chen Yunming, Mao Bin). Physics and Technology of Low Temperature Plasma [M]. Beijing: Science Press, 1980. 70~72
C. B. 德列斯文 著. 唐福林, 陈允明, 毛 斌 译. 低温等离子体物理及技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1980. 70~72