

激光 — MAG 复合焊等离子体辐射分析

李志勇¹, 王 威², 王旭友², 李 桓³

(1. 中北大学 焊接研究中心, 太原 030051
2. 哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150080 3. 天津大学 材料学院, 天津 300072)

摘 要: 对于 MAG 焊、激光 — MAG 复合焊的等离子体辐射, 采用中空探针, 使特定点的辐射通过探针对其等离子辐射进行空间分布采集, 对比分析激光复合前后等离子体辐射光谱的分布规律, 并结合高速摄像, 为激光 — MAG 复合焊的耦合机理研究和工程应用提供理论基础. 结果表明, 激光复合后, 在电弧中心形成一个辐射明显增大的区域, 区域外侧存在一个辐射降低区域; 在电弧前侧激光复合作用位置, 会形成一个以铁辐射谱线为主的“电离通道”. 激光复合后, 电离通道的存在为电弧的稳定提供了基础; 在中心区形成了能量集中的辐射通道, 改变了电弧中能量的分布, 使能量更集中于中心区域, 获得比传统 MAG 焊更大的熔深.

关键词: 激光; MAG 焊; 复合焊; 等离子体; 光谱

中图分类号: TG422 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2010)03-0021-05



李志勇

0 序 言

传统的 MAG 弧焊方法, 在工业上得到广泛应用, 但其存在焊缝熔深浅、高速焊接困难、热影响区大等缺点. 激光焊有高效、热影响区小、焊接质量高的优点, 但其装配精度要求高^[1,2], 且大功率激光器无论设备成本, 还是使用成本都较高, 使其工业应用受到限制. 激光 — 电弧复合热源在焊接上得到迅速发展^[3,4]. 其中激光 — MAG 电弧复合焊接技术是近几年国内外研究较多的焊接方法, 该方法具有增加焊缝熔深、提高焊接速度、减小焊缝变形等优点^[5], 对其复合方式工艺参数等开展了大量研究, 但对激光 — MAG 复合后等离子体的辐射特点、能量分布和耦合机理还缺乏足够认识. 无论是电弧还是激光, 焊接中其等离子体都会产生辐射^[6,7], 等离子体辐射中蕴含大量的焊接过程信息, 反映了电弧状态的变化和稳定性, 等离子体光谱在焊接测控上得到广泛应用^[8-10]. 因此, 对 YAG 激光 — MAG 电弧等离子辐射进行光谱采集, 研究其辐射的空间分布, 探讨激光 — MAG 复合对等离子体的影响具有重要意义.

1 试验方法

试验采用德国 HAAS 公司 HI2006D 固体 YAG 激光器, MAG 电源采用奥地利 Fronius 公司的 TPS5000 数字焊接电源. 焊接过程中, 将表面经过机械加工的 Q235 钢板放置在匀速移动的焊接平台上, 电弧位置相对静止. 保护气体采用 90/10 的 Ar + CO₂, 焊接参数如表 1 所示.

表 1 复合焊试验焊接工艺参数
Table 1 Welding parameters of hybrid welding process

焊接速度 v/(mm·min ⁻¹)	平均电流 I/A	平均电压 U/V	激光功率 P/kW	气体流量 q/(L·min ⁻¹)
0.3	190~210	27~28	2	20

为了对复合前后等离子弧的辐射进行空间分布变化研究, 采用中空探针法进行等离子体特定点的辐射采集. 中空探针内径 1.0 mm, 探针与后部细管长度 400 mm, 探针距电弧中心 80 mm; 采用荷兰 Advantec 公司的 Avaspec-2048 FT-2 光纤式光谱分析仪, 分辨率为 0.3 nm. 试验装置如图 1 所示. 通过中空探针取电弧空间特定点的辐射信息. 取光原理如图 2 所示. 中空探针仅允许与探针内径大小基本一致测试点 (1 与 1' 范围内) 的弧光辐射通过, 而超出此尺寸的 2 与 2' 点, 其辐射不会通过取光通道.

收稿日期: 2008-10-17
基金项目: 国家科技部支撑项目 (2006BAF04B10); 国家自然科学基金资助项目 (50505048); 黑龙江省自然科学基金资助项目 (ZJ0610)

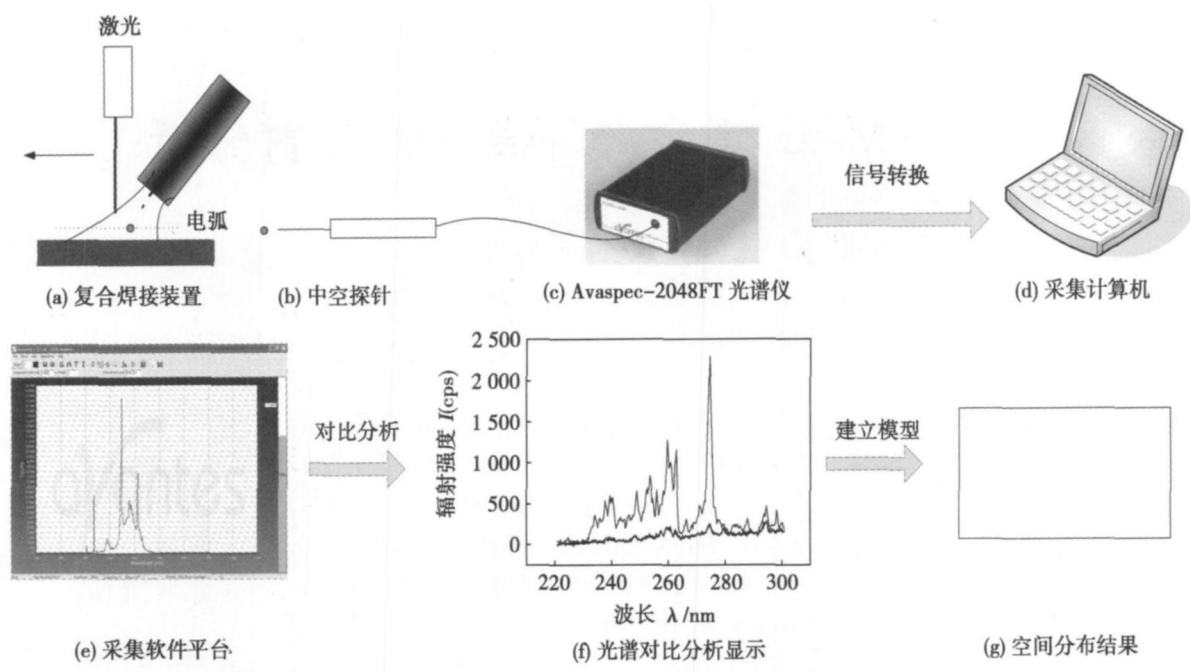


图 1 光谱采集试验装置示意图
Fig 1 Sketch of spectrum collecting experimental setup

这种取光方法与传统的狭缝取光相比，空间定位更精确，且前端没有采用光学成像系统，减少光学系统对辐射造成的损失。

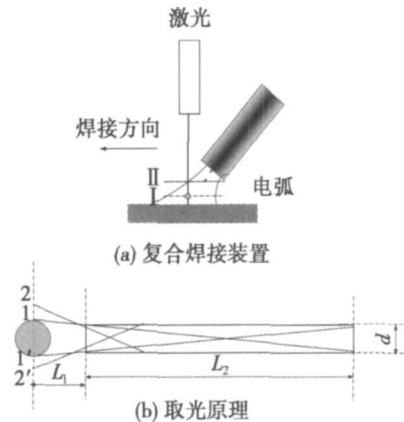


图 2 探针法取光原理示意图
Fig 2 Schematic of hollow probe method

通过设定的 x 、 y 轴双向调节系统，可调整探针与等离子体的相对位置，实现空间不同点的辐射采集。试验中，进行两个典型截面（图 2 a 中，I、II）的光谱信息扫描，截面 I 距试板 3 mm，截面 II 距试板 5 mm。在中心截面再完成沿垂直方向的纵向扫描。取光后的定点辐射，通过同点安装的“Y”字形光纤，传输到光谱仪，实现对 200~1100 nm 波段范围光谱信息的同步采集。为对比电弧形态变化，同时对电弧进行高速摄像，拍摄频率为 1 000 帧 / s。

2 光谱试验采集结果及分析

2.1 整体辐射光谱的对比分析

图 3 给出了 MAG 焊、复合、激光三种焊接条件下，瞬时等离子体辐射的高速摄像图像；图 4 给出了其整体辐射的光谱对比。

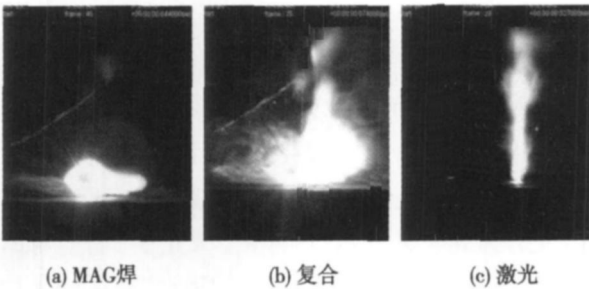


图 3 三种等离子体高速摄像对比
Fig 3 High speed photo of three kinds of plasmas

从图 3 可看出，MAG 焊电弧弧态介于钟形和碟形间。激光焊的等离子体呈现出柱形的形态，且等离子体辐射的图像为“柔和”的较暗图像，与 MAG 焊明亮的白色电弧存在明显的差别。激光与 MAG 复合后，电弧辐射的体积明显增加，在激光复合部位，得到明亮的较强辐射区间，与单纯 MAG 焊相比，改变了其介于钟形和碟形间的弧态；与单纯激光焊相比，除等离子体上部的柱形图像外，复合部位出现较亮的宽辐射图像。

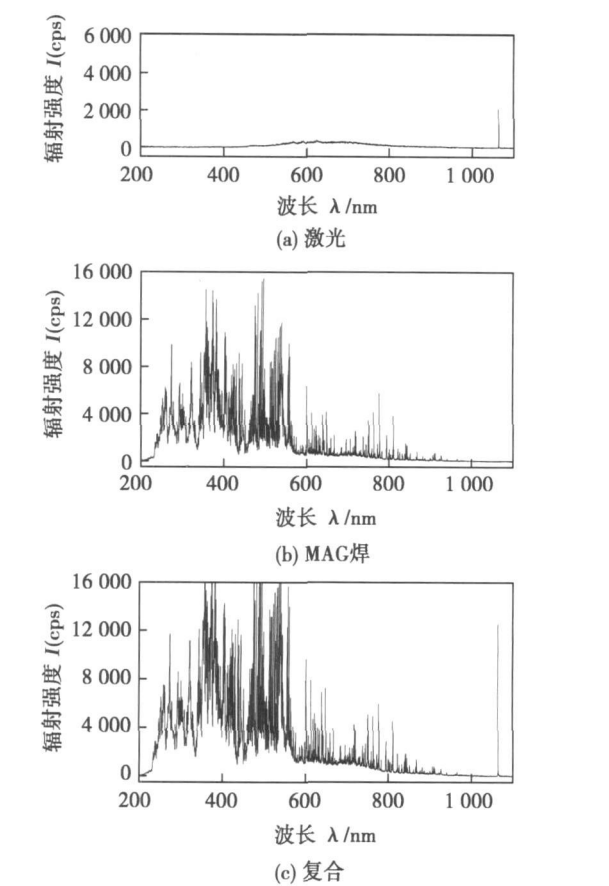


图 4 三种等离子体光谱对比

Fig. 4 Spectra of laser, MAG and laser/MAG hybrid

结合图 4 的等离子体光谱采集结果, 单纯激光产生的等离子体辐射较弱, 图 4 a 的光谱表明, 其辐射主要为介于 500 ~ 800 nm 间的连续辐射, 除在 1 016 nm 处由 YAG 激光散射造成的线谱外, 没有发现明显的线谱辐射. 图 4 b 为电弧的等离子体辐射光谱, 可看出电弧的辐射强于激光, 在连续辐射的基础上存在大量线谱, 线谱由紫外区 (200 ~ 350 nm) 的 Fe I、Fe II 辐射, 370 ~ 650 nm 间的 Fe 辐射和 650 ~ 1 100 nm 的 Ar 辐射组成. 由于喷射过渡中大量金属蒸气的存在, 电弧气氛中 Fe 元素浓度的升高, 370 ~ 650 nm 间的 Fe 辐射较强. 激光与 MAG 复合后的光谱辐射与 MAG 焊的辐射光谱相似, 对比谱线分布, 没有明显的新线谱产生, 但其在紫外区 (200 ~ 350 nm), 370 ~ 650 nm 间的 Fe 辐射增强.

2.2 不同区域的光谱辐射对比

扫描试验表明, 距试板表面 3 mm 截面上各点辐射光谱比 5 mm 截面上的辐射强、辐射区域宽, 这与其处于电弧弧柱的中部层面, 电弧辐射受熔池和焊丝的影响小有关. 但二者分布规律基本相同. 因此选距试板表面 3 mm 截面作为研究对象. 由于每隔 0.5 mm 间距进行采集, 扫描数据较多, 为分析方便, 将光谱变化特点归类, 分为四个区域: 激光电弧

耦合中心区、环形辐射减弱区、电离通道区、外围辐射区 (由于外围辐射区基本相同, 所以不单独讨论). 图 5 给出了三个典型区域的耦合前后扫描光谱分布对比.

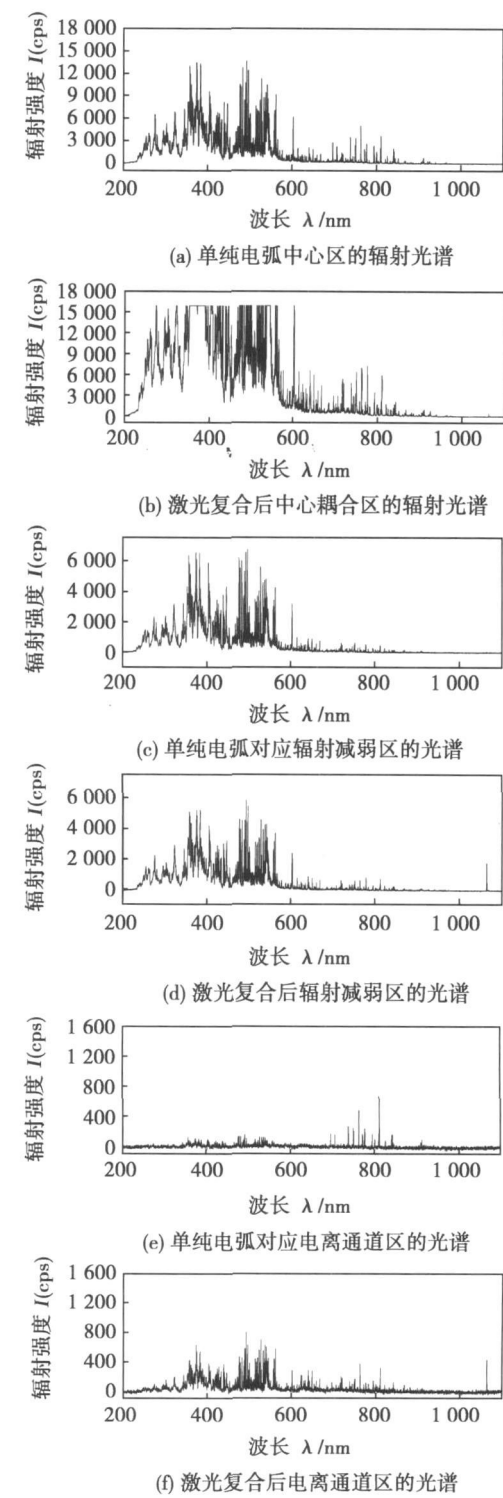


图 5 复合前后光谱辐射区域对比

Fig. 5 Radiation from different zones of plasmas

图 5 a、b 为中心区的辐射对比, 可看出有激光—MAG 复合的焊接电弧中心区 (图 5 b) 辐射强度明显

高于 MAG 焊的电弧 (图 5 a)。激光复合增强了电弧中心区的辐射强度, 提供了更集中的能量。耦合中心区已离开激光作用部位, 进入电弧中心。

图 5 c、d 为中心区外侧存在的轻微辐射减弱区, 这个区域中, 激光复合电弧 (图 5 d) 的辐射强度略低于单纯电弧 (图 5 c) 的辐射强度。其在 350 ~ 550 nm (Fe 谱线为主) 间的辐射降低比较明显。这与复合后电弧的能量分布发生变化有关; 另一方面, 激光复合电弧后, 会造成焊接电流的轻微降低, 也是产生辐射变化的一个原因。

图 5 e 为电离通道区, 这个区间存在于激光复合的前侧复合部位附近。从激光—MAG 复合焊的光谱分布可看出, 激光复合时 (图 5 f) 在 300 ~ 600 nm 间的金属谱线聚集区间内存在大量线谱, 表明复合区域存在一定浓度的铁蒸气。而在 MAG 焊的电弧中 (图 5 g) 以氩的线谱辐射为主, 金属蒸气辐射很弱, 不存在电离通道。图 6 给出了激光—MAG 复合时的高速摄像照片, 激光作用部位为电弧提供了电离通道, 在焊接过程中, 电离通道有效地稳定了电弧, 并加强电弧辐射的强度。

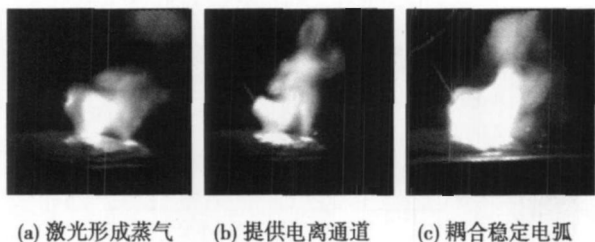


图 6 激光复合时电弧的高速摄像照片

Fig 6 High speed photo of laser-MAG hybrid process

除了上述三个典型区域外, 还有一个外围辐射区, 外围辐射区主要存在于没有激光复合的电弧一侧, 在此区间激光复合和单纯电弧的辐射基本相同, 没有较大差别。中心截面垂直方向的纵向扫描采集光谱分布表明, 电弧中部的弧柱辐射很强, 在焊丝和熔池附近的辐射会减弱。

2.3 激光电弧复合焊等离子体耦合模型

基于上述光谱辐射分析, 激光电弧复合后, 在激光作用位置附近, 会产生“电离通道区”, 此区间存在一定强度的 Fe 谱线, 较高的铁蒸气浓度为电弧的扩展和稳定提供了物理条件。在电弧的中心位置, 会产生辐射增强区, 此区间复合电弧的辐射强度远远超过没有复合的电弧, 在电弧中下部, Fe 辐射聚集区的辐射要高出一倍。在中心区外侧, 复合电弧辐射的强度迅速降低, 形成较陡的辐射梯度分布,

在增强区两外侧会存在辐射轻微减弱区, 复合后侧的辐射有轻微差别, 但基本一致。图 7 给出了上述耦合区域的分布模型。激光耦合模型的不同作用区域, 改善了电弧稳定性、能量分布形式, 改变激光—MAG 焊缝成形, 提高焊接质量。

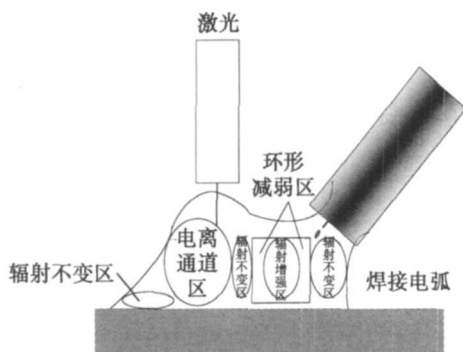


图 7 激光—MAG 复合等离子体光谱分布模型

Fig 7 Distribution model of laser-MAG hybrid plasma

3 结 论

(1) 激光作用于电弧前端, 与电弧复合激发出较多铁蒸气, 产生有利于电弧稳定“电离通道区”。

(2) 激光复合后, 会在电弧中心区小半径范围内, 形成一个辐射明显增大的区域, 区域外侧存在一个辐射降低的环形区域, 在中心区形成了一个能量集中柱形辐射通道, 使能量更集中于中心区域。

(3) 在没有激光作用的电弧后侧, 存在等离子体的外围区域, 此区域激光复合对等离子体的辐射影响不大, 但激光会造成电弧辐射区域的加大, 增加加热范围, 进而增加焊缝宽度。

参考文献:

- [1] 胥国祥, 武传松, 秦国梁, 等. 激光 + GMAW 复合热源焊缝成形的数值模拟[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[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(6): 641—646
- [2] Campana G, Fortunato A, Ascari A, et al. The influence of arc transfer mode in hybrid laser-MIG welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(1—3): 111—113
- [3] 康 乐, 黄瑞生, 刘黎明, 等. 低功率 YAG 激光—MAG 电弧复合焊接不锈钢[J]. 焊接学报, 2007, 28(11): 69—72
Kang Le, Huang Ruisheng, Liu Liming, et al. Low-power YAG laser-MAG arc hybrid welding of stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(11): 69—72

[下转第 28 页]

后达到网络收敛要求的误差精度 1.0×10^{-5} 。

(4) 新特征值熔透模式识别。试验获取不同熔透状态下新的 MIG 焊电弧声信号频带能量特征参数各 20 组, 代入网络 NN₁ 求取 10 维新特征值, 再将新特征值输入识别网络 NN₂ 求其输出, 即得到利用新特征值的熔透诊断结果。其中熔透与焊瘤模式诊断准确率达到 95%, 未熔透模式诊断准确率为 90%。可见, 采用重新合成的低维新特征和训练的 BP 网络能够较为准确的映射 MIG 焊熔透状态, 而出现误判的原因在于所选样本数据处于过渡状态。

(5) 检验。采用第一步中的 100 组原始数据作为训练样本, 建立运用初始特征值进行熔透状态识别的 BP 网络 NN₃ (20, 10, 3)。学习 1 600 次以后满足误差精度要求 1.0×10^{-5} , 将第四步中的 60 组数据输入网络 NN₃ 得到应用原始特征值的熔透诊断结果。与第四步诊断结果相比, 原始特征在熔透模式诊断的准确率上较降维特征整体低 5%, 熔透与过熔透状态达到 90%, 未熔透状态达到 85%。

4 结 论

(1) 提出特征参数灵敏度的神经网络计算方法, 并以此作为评价特征参数的准则函数, 实现了对电弧声信号频带能量特征参数的有效评价与选择, 将 20 维特征参数压缩为 10 维最优特征子集。

(2) 熔透状态诊断应用实例表明, 电弧声信号新旧特征值均可有效的表征熔透状态模式, 且降维特征较原始特征的诊断准确率高出 5 个百分点; 说明电弧声与熔透状态的关系具有高度的复杂性, 并

存在一定的随机性, 也证明了神经网络在特征评价与降维的可行性。

参考文献:

- [1] 乔新勇, 安 钢, 刘建敏. 基于神经网络的柴油机特征参数评价与选择[J]. 装甲兵工程学院学报, 2003, 17(3): 29—32.
Qiao Xinyong, An Gang, Liu Jianmin. Evaluation and selection of diesel characteristics based on artificial neural network[J]. Journal of Armored Force Engineering Institute, 2003, 17(3): 29—32.
- [2] 杜灿谊, 陆华忠, 喻菲菲, 等. 基于虚拟仪器和神经网络的汽车自动变速器故障诊断方法的研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2006, 20(1): 1—5.
Du Canyi, Lu Huazhong, Yu Feifei, et al. Study of automatic transmission fault diagnosis based on virtual instrument and neural network[J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2006, 20(1): 1—5.
- [3] 徐章遂, 房立清, 王希武, 等. 故障信息诊断原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [4] Fanni A, Gha A, Sandoli E. Neural networks for multiple fault diagnosis in analog circuits[J] // IEEE Computer Society. Proceedings of the IEEE International Workshop on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, 1993, 303—310.
- [5] Kirkland L V, Wright R G. Using neural networks to solve testing problems[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1997, 12(8): 36—40.

作者简介: 刘立君, 男, 1968 年出生, 博士, 教授。主要从事焊接自动控制方面的科研和教学工作。发表论文 60 余篇, E 检索近 30 篇。

Email: 888liujun@163.com

[上接第 24 页]

- [4] Hu B, Den Ouden G. Synergetic effects of hybrid laser arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(4): 427—431.
- [5] 王 威, 王旭友, 秦国梁, 等. 铝合金激光—小功率脉冲 MIG 电弧复合热源焊接特性分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(8): 37—40, 61.
Wang Wei, Wang Xu you, Qin Guoliang, et al. Welding characteristics of laser low power pulse MIG hybrid welding aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(8): 37—40, 61.
- [6] Sibillano T, Ancona A, Berardi V. Correlation analysis in laser welding plasma[J]. Optics Communications, 2005, 251(1—3): 139—148.
- [7] Li Junyue, Li Zhiyong, Li Huap, et al. Basic theory and method of welding arc spectrum information[J]. Chinese Journal of Me-

chanical Engineering, 2004, 17(2): 315—318.

- [8] 李志勇, 王 宝, 李 桓, 等. 干扰因素下钢 TIG 焊电弧光谱的研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(12): 1492—1495.
Li Zhiyong, Wang Bao, Li Huan, et al. Study on TIG welding arc light spectrum of steel with disturbing factor[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(12): 1492—1495.
- [9] 杨运强. 熔化极脉冲焊熔滴过渡的光谱在线传感器与控制的研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [10] Li Junyue, Song Yongjun. Spectral information of arc and welding automation[J]. Welding in the World, 1994, 34(9): 317—324.

作者简介: 李志勇, 男, 1972 年出生, 博士, 副教授。主要从事焊接电弧物理、焊接过程控制和焊接材料方面的研究。发表论文 30 篇。

Email: lhy_2002@126.com

Abstract: The effects of welding speed and welding direction on Nd:YAG laser short current MAG hybrid welding stability were investigated. The experimental results showed that welding arc stability of MAG and laser+MAG would decrease with the increasing of welding speed, but the arc of laser+MAG get more stable comparing with MAG arc. The maximal welding speed of laser+MAG is more than one time fast comparing with that of MAG. The hybrid welding arc in arc leading direction would get more stable comparing with that of laser leading direction.

Key words: GMAW; laser welding; hybrid welding; welding process stability

Analysis of laser/MAG hybrid welding plasma radiation

LI Zhiyong¹, WANG Wei², WANG Xuyou³, LI Huan¹ (1. Welding Research Center, North University of China, Taiyuan 100081, China; 2. Harbin Welding Institute, Harbin 150080, China; 3. School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). P 21—24, 28

Abstract: Hollow probe is used to detect the plasma radiation of specific point passing the probe for spectrum collecting. The radiation of MAG and laser/MAG hybrid welding are collected with fiber spectrometer. The spatial distribution of the radiation is analyzed to compare the differences between welding process with and without laser hybrid. Furthermore, high speed video is also applied to study the coupling mechanics of laser/MAG hybrid. The result shows that a higher radiation intensity zone will be formed in the arc center. Beside the center zone, there is a somewhat lower radiation intensity zone. An ionized duct zone will be formed near the laser focused point. The ionized duct is dominated by Fe line. The ionized duct makes the welding arc more stable when the laser is applied. The higher radiation intensity zone changes the distribution of plasma energy, thus makes the energy focus on the arc center. The coupling effect of laser/MAG hybrid welding will form weld bead with deeper penetration than MAG welding.

Key words: laser; MAG; hybrid welding; plasma; spectrum

Feature evaluation and selection of penetration arc sound signal based on neural network LIU Lijun¹, LAN Hu², ZHENG Hongyan¹ (1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang, China; 2. School of Material Science & Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 3. Applied Science College, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China). P 25—28

Abstract: In welding process, penetration detection and diagnosis based on arc sound, how to choose its proper parameters is vital to diagnosis. The feature evaluation and selection methods were presented. The results trained by neural network were used to evaluate feature parameters. Because neural network satisfied the nonlinear mapping requirement for high-resolution information compression, the complex classification problem in welding penetration pattern recognition was transferred to feature processing stage, and feature extraction was realized by neural network effectively. An illustration validated the effectiveness

of the method.

Key words: neural network; penetration; arc sound; feature evaluation; pattern recognition

Influence of welding heat input on microstructure and properties of coarse grain heat affected zone in X100 Pipeline steel ZHANG Xiaoyong², GAO Huilin², ZHUANG Chuanjing¹, JI Lingang¹ (1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 3. Tubular Goods Research Center of China National Petroleum Corporation, Xi'an 710065, China). P 29—32

Abstract: The influence of welding heat input on the microstructure characterization and properties of coarse grain heat affected zone (CGHAZ) in a X100 Pipeline steel were investigated by means of thermal simulation technique, microscopic analysis method and mechanical property testing. The results showed that the strength and toughness of X100 Pipeline steel decreased with the welding heat input increasing. The microstructure of CGHAZ was mainly made up of bainitic ferrite and granular bainitic which could bring excellent strength and toughness when welding heat was about 10 kJ/cm. The quasi-polygonal ferrite and granular bainitic were formed with welding heat input about 20 kJ/cm, which could get fine strength-toughness. When the welding heat input was higher than 30 kJ/cm, the strength and toughness decreased because of the increasing of polygonal ferrite. Therefore, welding heat input at range of 10—20 kJ/cm was recommended in the welding process of X100 Pipeline steels.

Key words: X100 Pipeline steel; welding heat input; microstructure; properties

Establish of ultrasonic residual stress measurement system based on entire envelope weighting algorithm WU Zhonghua², ZHANG Shiping², SUN Haoyu², ZHU Zheng¹ (1. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China; 2. Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying 257017, Shandong, China; 3. School of Electrical Engineering and Automatic, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). P 33—36

Abstract: The entire envelope weighting algorithm is proposed in this paper and realized by virtual instrument to obtain residual stress by ultrasonic measurement. Different weight of reference point is assigned to measure time of echo signal more accurately. Compared with traditional single threshold method, the experiment results show that the algorithm improved the stabilization of repeat measurement at the same point by different conditions. The uncertainty is calculated to validate the accuracy of the ultrasonic measurement.

Key words: ultrasonic measurement; welding residual stress; weighting algorithm

High gradient residual stresses during laser deep penetration welding of titanium alloy ZHANG Kerong¹, ZHANG Jianxun¹ (School of Materials Science & Engineering, Xi'an Jiaotong