

文章编号:1673-9469(2012)02-0094-04

CO₂ 激光光束在直流 TIG 电弧中传输形态研究

张寰臻¹, 吴世凯², 张松², 肖荣诗²

(1. 河北工程大学 理学院, 河北 邯郸 056038; 2. 北京工业大学 国家产学研激光技术中心, 北京 100022)

摘要:使用光束光斑质量诊断仪检测了 CO₂ 激光垂直穿过直流 TIG 电弧后的光斑半径及传输方向的变化, 考察了激光离焦量及作用电弧位置对光斑的影响, 计算了光束通过电弧后的偏折角度。结果表明, 电弧等离子体的“负透镜效应”使得激光束在 0、+10 mm 离焦量下作用电弧中间位置时, 测量的光斑比原始光斑半径增大; -10 mm 离焦量下光斑缩小。电弧的“棱镜”折射, 使得光束穿过电弧后有向阴极的微小偏折, 计算偏折角度为 0.8°。激光束 0 离焦量, 作用电弧阳极附近时, 光斑呈椭圆。

关键词:激光物理; 负透镜; 折射; 等离子体; CO₂ 激光; 复合焊
中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

Beam configuration study of CO₂ laser transmitting in DC TIG arc

ZHANG Huan-zhen¹, WU Shi-kai², ZHANG Song², XIAO Rong-shi²

(1. College of Science, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 2. National Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Beam diagnosis was used to measure the laser radius and transmit direction when the CO₂ laser passed through the DC TIG arc and the influence of laser defocus and the arc position laser on the spot were studied, and the reflection angle was calculated. Results showed that Facula radius was enlarged for 0 and +10 mm laser defocus because of arc plasma's "Negative Lens Effect", and facula radius was reduced while laser -10 mm defocused. Since arc's refraction as a "Prism", laser's transmission direction was deflected to cathode for a small angle of 0.8°. Facula was elliptical for laser incidence near arc cathode.

Key words: laser physics; negative lens; refraction; plasma; CO₂ laser; hybrid welding

始于 20 世纪 70 年代末的激光电弧复合焊接, 是一种先进的连接技术, 它在改善桥接作用的同时, 增加焊接的速度和熔深, 降低了材料对激光的反射, 使焊接过程更加稳定, 两种热源均得到有效利用, 与传统的焊接方法对比有很大的工业加工优势, 目前已在造船、汽车及管道连接中得到很好的运用。在实际加工中, 通过改变激光、电弧能量的比率, 可实现从单纯的激光焊到电弧焊的过渡, 以适应不同的加工要求, 此外激光器及电弧热源的多样性也拓宽了复合焊应用的对象和领域^[1-2]。

尽管如此激光-电弧复合焊接自从提出以来直到上世纪九十年代才被关注, 并在北美、日本、德国、英国等研究机构开展了应用性研究和工业化探索, 成为国际焊接界关注的焦点。目前, 国内的哈尔滨工业大学、清华大学、大连理工大学等研究机构针对该技术进行了一定的研究和规律的摸索, 获得了一定指导性的结论。这些研究主要集中在复合方式、热源布置、电弧电流、激光功率、焊接速度、离焦量、激光与电弧作用距离等工艺参数对熔深、焊缝成形、过程稳定性及等离子体状态的影响等方面^[3-6]。

收稿日期: 2012-01-20

作者简介: 张寰臻(1982-), 女, 河北邯郸, 硕士研究生, 助教, 从事激光先进制造技术方面的研究。

本文利用光束光斑质量诊断仪主要研究 CO₂ 激光与直流 TIG 电弧垂直相互作用时,电弧对光束传输形态的影响,并使用高速摄像机在线检测电弧形貌,对实验结果给予理论分析。

1 实验方法及条件

实验采用 Rofin DC035 Slab CO₂ 激光器,光束模式为准 TEM₀₀ 模,经焦距 $f=300\text{ mm}$ 的旋转抛物面反射聚焦镜聚焦。聚焦激光束垂直作用于直流 TIG 电弧。弧焊电源为 Fronius TS5000 数字焊机^[7]。实验布置如图 1 所示。

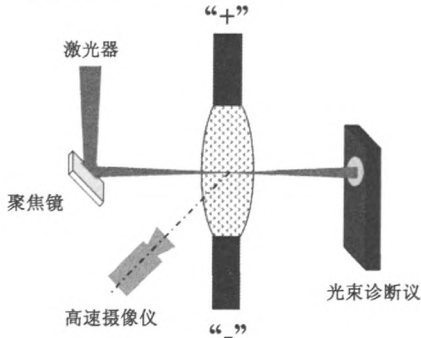


图1 TIG电弧对CO₂激光光束传输形态影响研究实验示意图
Fig.1 Experimental setup for the study of CO₂ laser beam configuration transmitting TIG arc

电弧电极为钨钨极,阴、阳极直径分别为 2.5 mm、10 mm,电极间距为 6 mm。电弧气氛为 Ar 气,流量为 15 L/min。Prometec UFF100 光束光斑质量诊断仪布置于激光焦点后 100 mm 处。美国 PHOTRON Fastcam 1024R2 彩色高速摄像机拍摄频率 1 000 帧/秒,观测位置垂直于激光-电弧所在平面。

2 实验结果

2.1 光斑半径的变化

图 2 所示为激光功率 500 W,不同电弧电流及相互作用位置时,光斑半径变化率($R_0/R_a, R_a$ 为穿过电弧后光斑半径, R_0 为原始光斑半径)。作用位置为:激光 0、+10 mm、-10 mm 离焦量穿过电弧中间(本文定义激光先于入射电弧聚焦为正离焦)。从图 2 可以看出,光斑大小受光束离焦量影响较大;0、+10 mm 离焦量时,光斑均扩大;+

10 mm 离焦量比 0 离焦量时光斑扩大明显,0 离焦量时光斑变化率在 1.051.15 倍之间;-10 mm 离焦量时光斑减小。

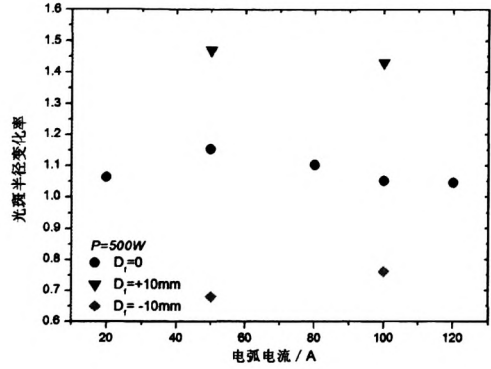


图2 不同离焦量下的光斑半径变化
Fig.2 Facula radius size enlarge ratio in case of different laser defocus

图 3 所示为电弧电流 100 A,激光功率 500 W,0 离焦量穿过电弧中间、距两极分别 0.5 mm 位置处时光斑形态。从图中可以明显看出,当激光作用电弧中间及靠近阴极时,光斑扩大;作用电弧阳极附近时,光斑不再圆对称,呈椭圆。

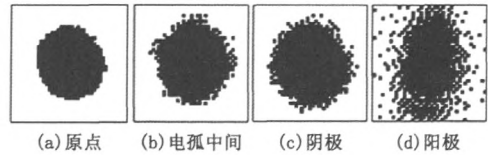


图3 激光作用电弧不同位置时的光斑截面图
Fig.3 Beam shape cross sectional for laser incidents in different arc position

2.2 光束的传输方向

本文测量了激光功率 500 W、0 离焦量,穿过 50 A 电弧中间位置后的传输方向。将光束光斑诊断仪布置于电弧后方不同位置处,对比穿过电弧前后光斑在诊断仪窗口中的位置变化,从而获得光束传输方向改变及偏转角度。实验结果如图 4、图 5 所示,光斑在诊断仪窗口中纵向下移,对应于电弧轴向阴极方向。光束穿过电弧后,传输方向有向阴极的轻微偏折,计算偏折角度为 0.8°。

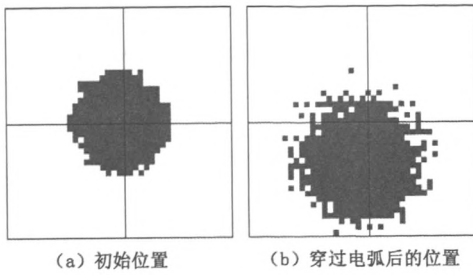


图4 光斑在诊断仪窗口中的位置改变(10mm×10mm)
Fig.4 Laser facula position movement in beam diagnosis window

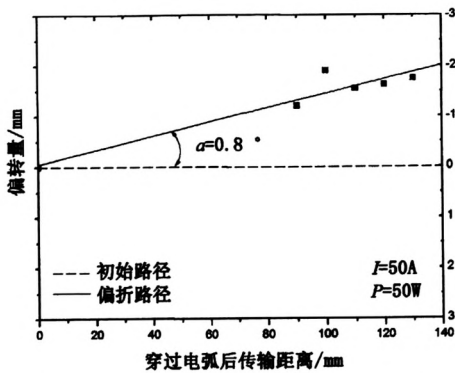


图5 激光束传输方向的改变(图中“a”为偏转角度)
Fig.5 Laser beam transmit direction change

3 分析与讨论

等离子体是物质存在的第四态,由带电粒子组成,对外呈电中性,具有集体效应。等离子体振荡的特征频率为

$$\omega_{pe} = \sqrt{n_e e^2 / m_e \epsilon_0} \quad (1)$$

式中: n_e —电子密度; ϵ_0 —真空介电常数。

圆频率为 ω 的光束在等离子体中传播时,色散关系满足

$$n^2 = 1 - \omega_{pe}^2 / \omega^2 \quad (2)$$

从式(1)、式(2)可以看出,等离子体折射率 $n < 1$,相对于大气为光疏介质。激光从大气中入射等离子体时,折射角大于入射角;等离子体的折射率与电子密度有关,电子密度越大,折射率越小,光束从低电子密度区向高电子密度区传输时,折射率不断减小,折射角大于入射角。

图6所示为高速摄像拍摄100 A电弧形貌,及不同离焦时光束在电弧中传输形态原理图。

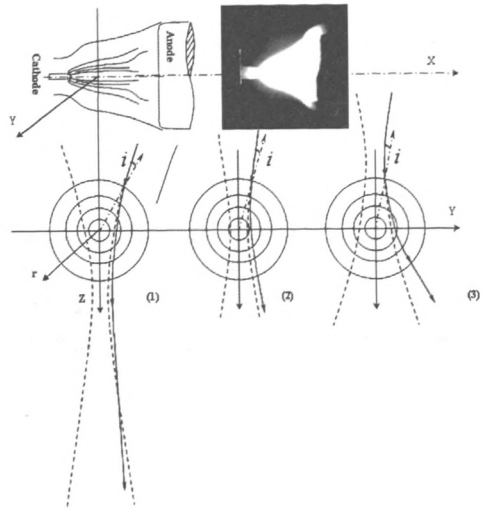


图6 电弧等离子体折射的“负透镜效应”
Fig.6 Arc plasma's "Negative Lens Effect"

电弧弧柱作为真正的等离子体,横截面上中心电子密度高,边缘电子密度低。光束在电弧中传输的前一半路程中,折射角总大于入射角;后半路程,入射角大于折射角。整个过程光束边缘不断偏离光束轴线而被扩束,即电弧等离子体的“负透镜效应”^[8-9]。

A. Poueyo - Verwaerde^[10]推导了激光深熔焊中光致等离子体的电子密度梯度引起的折射率梯度变化,以及对光束的偏折

$$\nabla n = \frac{1}{2N_{ec}} \nabla N_e \quad (3)$$

式中: $N_{ec} - \omega_{pe} = \omega$ 时的临界电子密度, $N_{ec} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

假设等离子体密度线性变化,光线在等离子体中传输引起的附加偏向角 δ 满足

$$\delta = \frac{\nabla n}{n} L = \frac{L}{2N_{ec}} \nabla N_e = \frac{N_e}{2N_{ec} R} L \quad (4)$$

式中: L —传输长度; N_e —电子密度最大值; $R - N_e$ 减小到零对应的长度梯度。

由于电弧横截面上电子密度中心对称分布,光束边缘线在电弧中传输一半路程近似为

$$L/2 = r \cos i \quad (5)$$

式中: r —电弧半径; i —光束在电弧表面的入射角。

传输一半路程对应的附加偏向角 δ 为

$$\delta' = \frac{N_e \cos i}{N_{ec}} \quad (6)$$

当光束离焦量为 +10 mm 时,出射光束的远场发散角减小为

$$\theta' = \theta - 2\delta' \quad (7)$$

可见,光束被扩束,束腰变大,焦点下移,远场发散角减小。由于实际测量位置为原始光束焦点以下 100 mm 处,因而测量的光斑比原始光斑半径减小,如图 6(1)所示。当离焦量为 0 时,光束在电弧中要经历聚焦,聚焦前发散角减小,聚焦后发散角增大,两相抵消使得发散角变化不大。测量的光斑变大主要是扩束的结果,如图 6(2)所示。当离焦量为 +10 mm 时,远场发散角增大为

$$\theta' = \theta + 2\delta' \quad (8)$$

光束的扩大以及远场发散角的增大,使得测量的光斑比原始光斑增大,且比 0 离焦量时光斑增大明显,如图 6(3)所示。

实验中,在光束轴向与电弧轴向所成平面上,电弧形态近似于三棱镜,如图 6 中高速摄像图像所示。对于普通石英三棱镜,折射率 $n > 1$,几何光学规律下光束向棱镜厚端偏折,且存在最小偏向角。当棱镜的折射率 $n < 1$ 时,光束穿过棱镜后会向尖端偏折,且存在最大偏向角。光路传输如图 7 所示,偏折角 Δ 满足

$$\Delta = \alpha - i_1 - i_2 \quad (9)$$

式中: i_1 、 i_2 —光线的入射角、出射角; α —棱镜顶角。

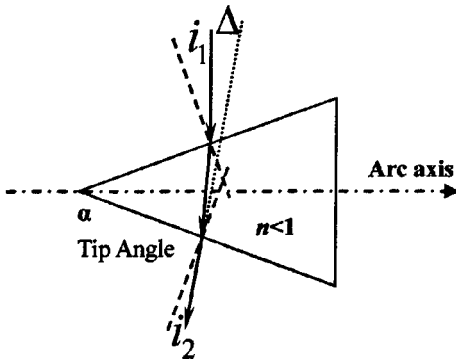


图7 折射率 $n < 1$ 的三棱镜对光线的偏折

Fig.7 Prism deflection for refractive index $n < 1$

由于该平面上电子密度关于电弧中心轴线对称分布,越靠近中心轴,电子密度等高线所成顶角越小,因此,光束边缘光线在电弧内部传输非直线,而是被不断偏折,但不改变两侧边缘线偏折的程度和方向。光束的双曲线形态,使得靠近阳极

边缘线入射角度大,阴极一侧边缘线入射角度小。因此,阳极一侧边缘线比阴极一侧边缘线向尖端偏折角度大。作用结果使得出射光束向阴极偏移,且光斑直径轴向扩大,故实验观测到 0.8° 的阴极偏向角。

当光束 0 离焦量作用电弧不同位置时,越靠近阳极,光束在电弧中的传输路径越长,横向及轴向的偏折效果越明显。由光束的双曲线形态可知,距束腰越远,光束边缘线的切线与光束轴线夹角越大,靠阳极一侧边缘线在电弧上入射角越大,另一侧入射角越小,轴向的棱镜偏折效果越明显。而激光离焦量为 0 时,电弧横截面上“负透镜效应”对光束只存在扩束效果,对远场发散角改变不大。于是,激光 0 离焦量作用电弧阳极附近时,光斑呈椭圆。

4 结论

1) 激光穿过电弧后,“负透镜效应”使得使得激光扩束,远场发散角改变。-10 mm 离焦量时光斑减小,0、+10 mm 离焦量时光斑变大,且 +10 mm 离焦量时光斑扩大更明显。

2) 激光 0 离焦量作用电弧不同位置时,光斑扩大,且在作用电弧阳极附近时光斑变椭圆。

3) 激光作用电弧后,传输方向改变,存在向阴极的偏折角,测量偏折角为 0.8°。

参考文献:

- [1] STEEN W M. Arc augmented laser processing of materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51 (11): 5636 - 5641.
- [2] JASNAU U, HOFFMANN J, SEYFFARTH P. Nd:YAG - Laser - GMA - Hybrid Welding in Shipbuilding and Steel Construction [J]. *Robotic Welding, Intelligence and Automation*, 2004, 299: 14 - 24.
- [3] NAITO Y, KATAYAMA S, MATSUNAWA A. Keyhole behavior and liquid flow in molten pool during laser - arc hybrid welding [J]. *Proc SPIE*, 2002, 48 (31): 357 - 362.
- [4] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laser hybrid welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 2005, 17(1): 2 - 14.
- [5] ISHIDE T, TSUBOTA S, WATANABE M. Latest MIG, TIG Arc - YAG laser hybrid welding systems for various welding products [J]. *Proc SPIE*, 2002, 48(31): 347 - 352.

ease, 1990, 34: 463 - 468.

- [9] 谢晶. 蛋涂膜保鲜剂的筛选与保鲜效果的研究[D]. 湖南: 湖南农业大学, 2009.
- [10] 刘美玉, 司伟达, 崔建云, 等. 室温下不同可食涂膜剂对鸡蛋保鲜效果的影响[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2011, 28(4): 96 - 100.
- [11] KEENER K M, LACROSSE J D, CURTIS P A, et al.

The influence of rapid air cooling and carbon dioxide cooling and subsequent storage in air and carbon dioxide on shell egg quality [J]. Poultry Science, 2000, 79(7): 1067 - 1071.

- [12] 江志伟, 沈蓓英. 蛋白质加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

(责任编辑 马立)

(上接第84页) 风险对象及其相互关系进行风险规划、风险识别、风险估计、风险评价、风险应对和风险监控, 实现煤矿安全生产风险管理的对象域在风险管理功能域和时域上充分耦合, 达到煤矿安全生产风险管理系统的结构精益化和功能整合化。

参考文献:

- [1] 李乃文, 罗海海. 重特大事故原因分析与对策[J]. 煤矿安全, 2007, (5): 90 - 93.
- [2] 陈宝智. 危险源辨识、控制及评价[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1996.
- [3] 何学秋. 安全工程学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.

- [4] 曹朝喜, 郭鹏, 朱煜明. 高科技项目集成风险管理及其流程体系研究[J]. 科学管理研究, 2005(6): 47 - 50.

- [5] 李从东. 集成化企业工程及其应用问题研究[D]. 天津: 天津大学, 1999.

- [6] 张智光. 面向集成化 MIS 的三维管理体系结构及其集成计划与控制[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, (3): 531 - 536.

- [7] 杨文安, 陈赟. 工程项目集成化风险管理研究[J]. 工业技术经济, 2005, (2): 103 - 105.

- [8] 黄敏. 基于模糊综合评判的虚拟企业风险评价[J]. 数学的认识与实践, 2004, (6): 46 - 51.

(责任编辑 刘存英)

(上接第93页)

- [6] LI S S. Binding energy of a hydrogenic donor impurity in a rectangular parallelepiped - shaped quantum dot: Quantum confinement and Stark effects[J]. Appl Phys, 2007, 101: 093716.
- [7] PEREZ - MERCHANCANO S T. Hydrostatic - pressure effects on the donor binding energy in GaAs - (Ga, Al) As quantum dots[J]. Phys: Condens Matter, 2007, 19: 026225.
- [8] WANG X F. Hydrogenic impurity in double quantum dots [J]. Phys Lett A, 2007, 364: 66 - 69.
- [9] LIU J J. The influence of compressive stress on shallow -

donor impurity states in symmetric GaAs - Ga1 - xAlxAs double quantum dots [J]. Appl Phys, 2007, 101: 073703.

- [10] XIA C X. Electron and impurity states in GaN/AlGaIn coupled quantum dots: Effects of electric field and hydrostatic pressure [J]. Appl Phys, 2010, 108: 054307.

- [11] SZAFRAN B. Parity symmetry and energy spectrum of excitons in coupled self - assembled quantum dots[J]. Phys Rev B, 2001, 64: 125301.

(责任编辑 马立)

(上接第97页)

- [6] NAITO Y, MIZUTANI M, KATAYAMA. Plasma/Plume behavior during welding: welding phenomena in hybrid welding using YAG laser and TIG arc [J]. Welding International, 2006, 20(10): 777 - 784.
- [7] 陈彦斌, 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.
- [8] 刘金合, 杨德才, 陆开静. 激光焊接的等离子体负透镜效应[J]. 激光与光电子学进展, 1999, 9: 138 - 141.
- [9] XIAO R S, ZUO T C, VOLZ R. Experimental research

on the influence of laser - induced plasma on the beam focusing during high - power CO₂ laser materials processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 1998, 7(6): 550 - 554.

- [10] POUETO - VERWAERDA A, FABBRO R, DESHORS G. Experimental study of laser - induced plasma in welding conditions with continuous CO₂ laser [J]. Journal of Applied Physics. 1993, 74(9): 5773 - 5780.

(责任编辑 马立)