

激光-MIG 复合焊熔透状态视觉检测方法的研究

双元卿¹, 单际国¹, 陈武柱¹, 张永强²

(1.清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2.首钢技术研究院, 北京 100041)

摘要:激光-MIG 复合对接焊中, 熔透状态是反映焊缝成形质量的重要指标。为获得反映熔透状态的信息, 在此采用视觉传感器对焊接过程中的熔池正面、小孔图像、熔池背面分别进行了检测。结果表明, 在复合对接焊条件下, 采用熔池正面图像检测或小孔热辐射图像检测的方法, 不能判断出熔透状态。采用主动照明的拍摄方式并选用合适滤光片的熔池背面图像的视觉检测方法, 能够获得反映焊缝熔透状态的图像。

关键词:激光-MIG 复合焊; 熔透状态; 视觉检测; 熔池背面

中图分类号: TG456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2008)12-0045-05

Study on the method of vision detection on penetration status in Laser-MIG hybrid welding

SHUANG Yuan-qing¹, SHAN Ji-guo¹, CHEN Wu-zhu¹, ZHANG Yong-qiang²

(1.Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Shougang Technical Research Institute, Beijing 100041, China)

Abstract: Penetration status is an important criterion to evaluate the weld quality of laser-MIG hybrid welding in gapped butt welding. In order to acquire the information of penetration status, vision sensors have been applied to detect the topside image of molten pool, image of keyhole and the backside image of molten pool in hybrid welding respectively. The results show that penetration status can't be identified by the methods of detecting the topside image of molten pool and image of keyhole with vision sensors in gapped butt hybrid welding. The backside image of molten pool recognizing the weld penetration status has been acquired by the vision detection method of applying an external illumination source and an appropriated filter.

Key words: laser-MIG hybrid welding; penetration status; vision detection; the backside image of molten pool

0 前言

作为激光焊的重要补充和发展, 激光-电弧复合焊由于熔深大、桥接能力强、效率高、气孔少等优点^[1], 在汽车、造船、起重机械等领域逐渐得到广泛的应用^[2]。对于间隙焊接, 衡量焊接成形质量的一个重要指标是焊缝的熔透状态, 一般要求完全熔透。因此, 为保证焊接质量, 有必要对复合焊接过程进行检测, 以保证良好的熔透状态。

视觉传感器能够检测到信号的强度和空间分

布等大量信息, 是一种有效的检测手段。在复合焊中, 国内外的许多学者也通过视觉传感器对焊接过程进行检测。日本 Osaka 大学的研究人员应用 CCD 拍摄了焊接过程中的电弧和等离子体的行为, 以解释复合焊中等离子的相互作用规律^[3-4]; 哈尔滨工业大学的研究人员通过 CCD 侧面拍摄复合焊过程中等离子体形态, 发现等离子体形态的变化反映了复合焊的焊接模式^[5]; 法国 CNRS 的研究人员在焊接过程中采用主动照明的方式从同轴方向检测了小孔和熔池图像^[6]; 日本 Keio 大学的学者在 YAG-TIG 复合焊中检测激光作用点的位置, 通过控制激光作用点相对电弧的距离来保证激光作用在最优位置^[7]。在上述应用中, 视觉传感器主要用来获取电弧、激光

收稿日期: 2009-01-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50175061)

作者简介: 双元卿(1982—), 男, 江西临川人, 博士研究生, 主要从事激光-电弧复合焊工艺优化及质量控制的研究工作。

等离子体以及熔池的图像,且多用于分析焊接过程的机理,而直接建立视觉图像和熔透状态之间关系的例子还很少。因此,本研究通过视觉传感器检测 CO₂ 激光—MIG 复合焊接过程中的熔池正面、小孔图像以及熔池背面,寻求能够反映复合焊熔透状态的视觉检测方法。

1 复合焊熔透状态视觉检测方法比较

复合焊过程中的光辐射源如图 1 所示,其中包括熔池正面热辐射、小孔内壁热辐射、熔池背面热辐射等。考虑到最有可能反映熔透的信息,在此主要对熔池正面、小孔、熔池背面三个研究对象进行视觉检测。

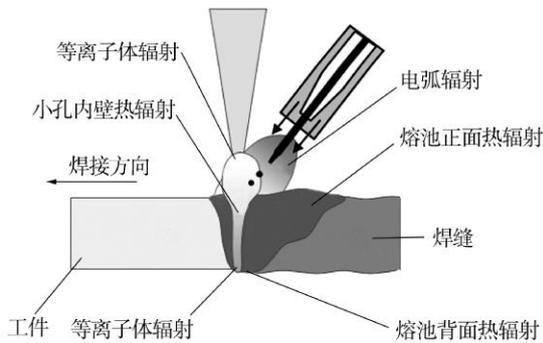


图 1 复合焊中的光辐射源示意

1.1 熔池正面视觉检测系统和方法

熔池正面图像能够比较直观地反映焊接状态。在复合焊中,由于等离子体的干扰,必须采用合适的滤光片以及适当的采样时间,才能获得清晰的熔池正面图像。熔池正面图像旁轴视觉传感系统结构如图 2 所示。采用霍尔电流传感器检测焊接电流,在电流脉冲进入基值的时刻触发摄像机曝光,以尽量减小弧光的干扰;摄像机镜头前添加中心波长为 980 nm,半带宽 10 nm 的干涉滤光片,以滤除弧光,获得熔池正面辐射的信息。

获得的熔池图像如图 3 所示,从图中可以看到熔池、小孔、过渡的熔滴。要从熔池正面图像推测熔透状态,需要建立熔池正面几何参数与熔深或熔透之间的关系。图 3 是堆焊条件下,在不同焊接参数时拍摄得到的熔池正面图像和对应的焊缝截面,表 1 是相应的焊接参数和焊缝截面参数。图 3a、图 3b、图 3c 正面熔宽依次减小,但是图 3b 熔深最浅。图 3a 的焊接速度比图 3c 小,激光功率比图 3b 大,熔深和正面熔宽比后两者都要大;图 3b 和图 3c 相比,电流一样,焊接速度小,激光功率小,结果正面熔宽大,

熔深小。

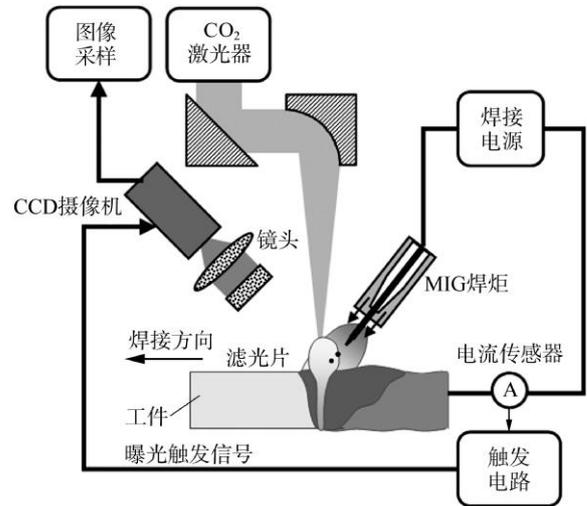
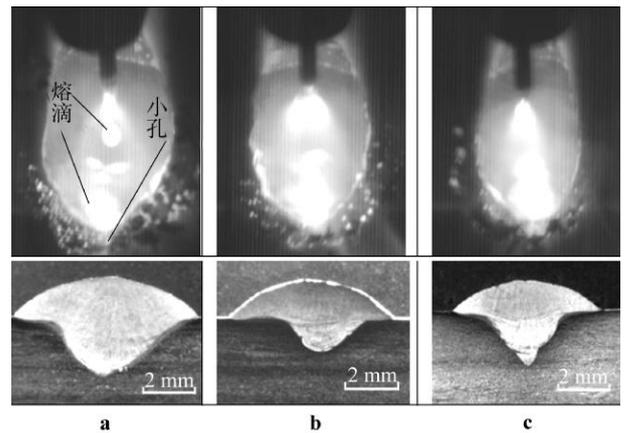


图 2 复合焊熔池正面视觉传感系统结构



(材料:5 mm 厚不锈钢;滤光片:中心波长 980 nm 窄带干涉滤光片)

图 3 不同工艺下熔池正面图像及截面形状

表 1 图 3 焊接工艺及焊缝截面参数

编号	激光功率 P/kW	电弧电流 I/A	焊接速度 v/mm·s ⁻¹	熔深 h/mm	熔宽 b/mm
图 3a	2.0	140	10	2.75	8.64
图 3b	1.2	140	10	1.51	7.61
图 3c	2.0	140	15	2.56	6.88

结果表明在多个参数发生变化时,正面熔宽和熔深之间并不是简单的单调关系。根据复合焊工艺参数的相互作用规律可知,复合焊熔深受激光功率影响较大,正面熔宽受焊接电流影响较大,激光功率和电流是相互独立的调节参数,因此正面熔宽和熔深之间并没有必然的联系,正面熔池长度、面积等其他几何参数和熔深之间也没有必然的联系,只从熔池正面几何信息来推测熔深甚至熔透状态是

不可行的。

1.2 复合焊小孔图像视觉检测系统和方法

激光深熔焊的基本特征是产生小孔效应,而在激光电弧复合焊中,同样存在小孔。由于复合焊中熔深主要由激光决定,因此小孔完全有可能成为复合焊正面熔透检测有用的信息源。图 4 为小孔图像同轴视觉传感系统结构,分光镜不影响 CO₂ 激光的正常传输,反射小孔内壁处辐射光并转为水平方向输出到摄像机。镜头前使用中心波长 830 nm,半带宽 10 nm 的干涉滤光片。复合焊时,摄像机在脉冲电流进入基值时曝光。

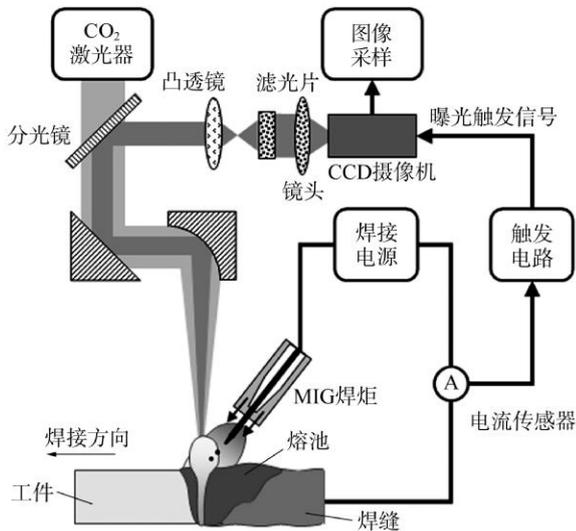
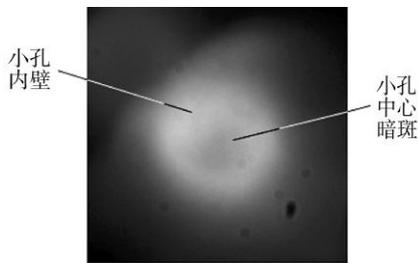


图 4 同轴视觉传感系统结构

在厚 3 mm 的不锈钢板上单独激光堆焊时获得的小孔图像如图 5 所示,从图中可以看到,在小孔中心处出现了暗斑,说明此时小孔已穿透工件。

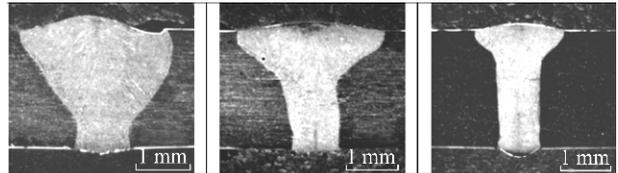


(激光功率:2.3 kW;焊接速度:7 mm/s)

图 5 激光焊同轴小孔图像

激光焊中,当工件适度熔透时,在同轴方向观察到的小孔热辐射图像中心会出现一个较暗区域,这可以作为熔透的绝对判据^[8]。目前应用该原理进行熔透控制的研究集中在厚度小于 1 mm 的薄板焊接中。图 6a 是图 5 对应的厚 3 mm 不锈钢激光焊缝截面,此时焊缝已明显发生过熔透。而在过熔透(图 7b)、

适度熔透(图 7c)的焊接条件下,从同轴图像中都很难看到小孔熔透的特征图像。这说明工件厚度增加时,小孔熔透的特征图像较难获取。在复合焊条件下,受到电弧和过渡熔滴的强烈干扰,不仅成像条件恶劣,而且小孔不稳定性增加,因此更难从小孔热辐射中获取熔透的特征图像。

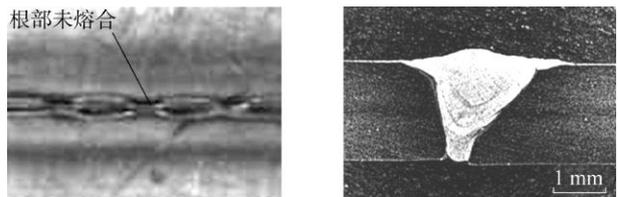


a 速度 7 mm/s b 速度 10 mm/s c 速度 16 mm/s

(激光功率:2.3 kW;滤光片:中心波长 830 nm)

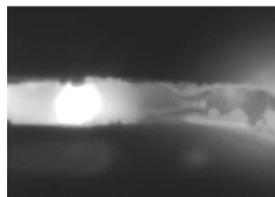
图 6 3 mm 厚不锈钢激光焊接焊缝截面

在带有间隙的对接复合焊条件下,即使获得了小孔穿透的特征图像,也不能判定焊接熔透,原因在于小孔穿透熔池并不能保证焊缝根部熔合。图 7a 是复合焊接过程中出现的一个不稳定熔透段背面照片,图 7b 是未熔透处的焊缝截面照片,图 7c 是对应该截面的熔池背面图像,图 7d 是焊接过程熔池截面的示意。图 7c 中的亮斑表明小孔已经穿透熔池,但是此时焊缝根部并未熔合,而根部完全熔合才能保证对接焊的焊接质量,因此在激光焊中适用的小孔穿透特征图像,不能作为带间隙复合对接焊中的熔透特征信号。

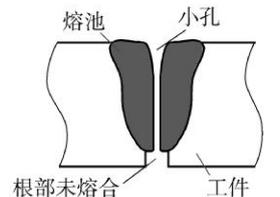


a 焊缝背面照片

b 焊缝截面照片



c 熔池背面图像



d 焊接过程熔池截面示意

(激光功率 2 kW;电流 80 A;速度 16 mm/s;坡口间隙宽度 1 mm)

图 7 根部未熔合情况下的复合焊缝及小孔图像

对图 7d 分析如下:要维持小孔的喷发和提供足够的压力,在激光作用点处需要有足够的金属,金属可以从母材和填充金属中获得。在间隙宽度相对小孔直径很小时,母材总能够为小孔形成提供足

够的金属,这时的小孔与熔透的关系与单独的激光焊类似,小孔穿透熔池等同于穿透工件,即焊接熔透,特征信号为小孔图像中心出现暗斑。如果间隙宽度相对较大,母材就不能够为小孔形成提供足够金属,维持小孔存在的金属主要从填充金属中获得,而此时激光作用处的熔池金属不一定达到焊缝根部,小孔穿透熔池并不等同于穿透工件,因此根据小孔穿透熔池的特征图像并不能判断焊接熔透状态。

1.3 熔池背面图像的视觉检测系统和方法

熔池背面图像的视觉传感系统结构如图 8 所示。摄像机置于工件下方,为防止飞溅,采用倾斜放置的方式。辅助照明光源选用 250 W 的卤素灯,摄像机镜头中轴线、光源发射轴线以及焊缝纵轴线处在同一个面上,镜头中轴线和光源发射轴线沿工件底面法线对称放置,相对底面倾斜角约为 45°。

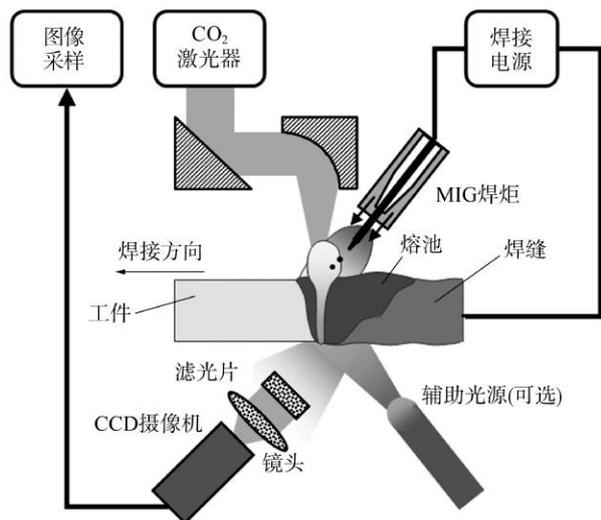
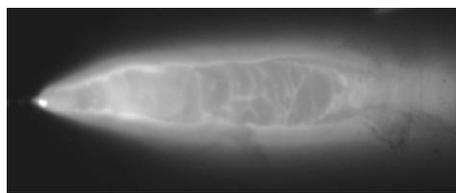


图 8 熔池背面视觉传感系统结构

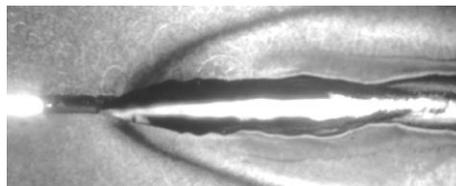
图 9 为不使用和使用辅助光源时获得熔池背面的图像。不使用辅助光源时,图像边缘较为模糊,不易确定背面熔宽;使用辅助光源后,熔池和母材间具有清晰的边界。

前面实验排除了从熔池正面图像或小孔图像检测熔透状态的可行性,而检测熔池背面图像是判断熔透状态的最直接方法。从图 9b 中可以看到,使用辅助光源后熔池边缘更为清晰。图 10 为不同焊接规范下拍到的熔池背面图像,白色线标识的是图像处理检测到的熔池边缘。可以看到,不同规范下的熔池和母材的边缘都比较清楚,根据熔池背面熔宽,从而可以判断出焊接过程的熔透状态。



(激光功率 2 kW; 电流 140 A; 速度 15 mm/s; 坡口间隙宽度 0 mm)

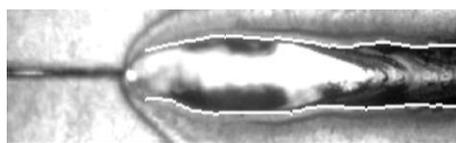
a 无辅助光源



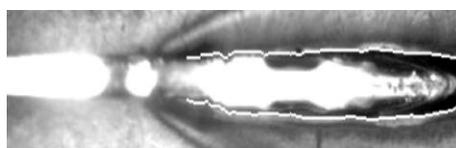
(激光功率 2 kW; 电流 140 A; 速度 13 mm/s; 坡口间隙宽度 1 mm)

b 有辅助光源

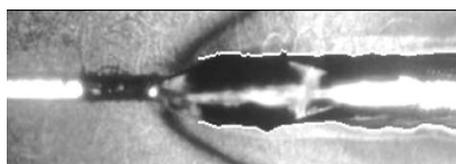
图 9 熔池背面图像



a 电流 40 A, 速度 12 mm/s



b 电流 100 A, 速度 17 mm/s



c 电流 140 A, 速度 15 mm/s

(3 mm 厚不锈钢; 对接焊; 激光功率 2 kW)

图 10 不同焊接规范下的熔池背面图像

2 熔池背面视觉检测的照明方式和滤光片选择

通过前面对不同检测方法的比较可以发现,只有熔池背面视觉检测可以直接获得表征熔透状态的信息。在背面视觉检测中,为获取清晰的熔池背面图像,需要考虑拍摄时选用何种照明方式,光路中选用何种滤光片等问题。

图 9a 由于没有辅助光源,只能利用熔池和母材的热辐射成像。要获得熔池背面清晰的边界,必须在图像中标定温度场。使用单一波段的辐射光测定稳

定场的方法,需要建立接收元件电信号和被测物体表面温度的函数关系。在实际焊接过程中,接收元件电信号和被测物体表面温度之间的函数关系并不是恒定不变的,受到被测物体表面状态、光路中元件的透过率、与物体距离等因素的影响,这些都会增加测量的误差。有学者使用比色的方法测温,例如使用双色盘滤光^[9],或使用彩色图像上三种基色的强度比值确定温度场^[10]。这些方法在一定程度上消除了发射率等对测量结果的影响,获得较为真实的温度场,但缺点是设备复杂,或者前期需要较为繁杂的标定工作。

本研究视觉检测的目的是获取焊缝熔透状态的信息,即熔池背面的宽度,从而能够判断焊缝是否完全熔透。能够反映熔池宽度的除了温度场分布外,还有熔池的几何形状和物态差别。热辐射成像主要反映温度场的分布,在固液界面温度场并没有突变,因此图像上固液界面的区分并不明显,导致图 9a 中的熔池边界不清楚。如果拍摄时添加辅助光源,照明光束经熔池上不同曲面反射后进入摄像机的强度会有所不同,表面粗糙的母材和表面光滑的熔池对光束的反射情况也有所不同,据此可以得到含有熔池宽度信息的图像。

CCD 感光元件的光谱相对响应曲线如图 11 所示。为提高 CCD 的灵敏度,减小曝光时间,在此选用通过绿光的滤光片。作为对比,研究了不同滤光片下的拍摄结果,图 12a 为使用中心波长为 830 nm 的窄带干涉滤光片拍到的图像,熔池的辐射光很强,熔池边缘依旧模糊;图 12b 为使用通过绿光的滤光片得到的图像,对比度较好,熔池辐射光基本上滤除了。因此,采用主动照明的方式,选择合适的滤光片,可以获得清晰的背面熔池图像,从而判断熔透状态。

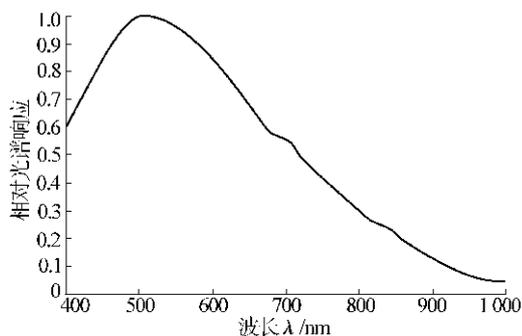
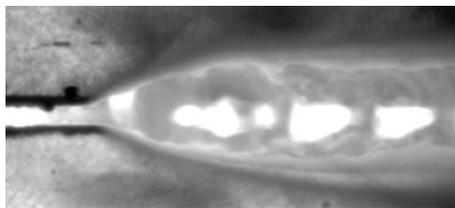


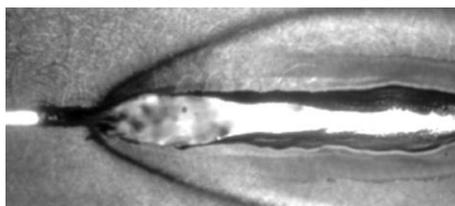
图 11 CCD 感光元件光谱响应曲线

3 结论

(1)研究了不同检测对象与熔透状态的关系,结



a 中心波长为 830 nm 的窄带滤光片



b 通过绿光的滤光片

(激光功率 2 kW; 电流 140 A; 速度 13 mm/s; 坡口间隙宽度 1 mm)

图 12 主动照明条件下熔池背面图像

果表明在复合对接焊条件下,采用熔池正面图像或小孔热辐射图像的视觉检测方法不能判断熔透状态。

(2)建立了熔池背面图像的视觉传感系统,采用主动照明的拍摄方式,选用合适的滤光片,获得了清晰的熔池背面图像,能够反映焊缝的熔透状态。

参考文献:

- [1] Steen W M, Eboo M. Arc augmented laser welding[J]. Metal construction, 1979, 11(7): 332-335.
- [2] Graf T, Stauffer H. Laser-hybrid welding drives VW improvements [J]. Welding journal, 2003, 82(1): 42-48.
- [3] Naito Y. Observation of keyhole behavior and melt flows during laser-arc hybrid welding[R]. ICALEO 2003, 1005.
- [4] Uchiumi S, Wang J B, Katayama S, et al. Penetration and welding phenomena in YAG Laser-MIG Hybrid Welding of Aluminum Alloy[A]. Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics 2004[C]. Section Hybrid Laser Welding: 76-85.
- [5] Chen Y B, Lei Z L, Li L Q. Study of welding characteristics in CO₂ Laser-TIG hybrid welding process[R]. ICALEO 2003, 306.
- [6] Coste F, Fabbro R, Allais C, et al. Laser and hybrid welding of high strength steel application to pressure vessel manufacturing [R]. ICALEO 2005, Section LMP: 174-182.
- [7] Kim T, Suga Y, Koike T. Welding of thin steel plates by hybrid welding process combined TIG arc with YAG laser[J]. JSME International Journal, Series A, 2003, 4(3): 202-207.
- [8] 贾磊. CO₂ 激光焊同轴视觉系统及熔透检测与控制的研究[D]. 北京: 清华大学机械工程系, 2004.
- [9] 张华, 潘际銮, 廖宝剑. 焊接温度场的实时检测及等温线宽度闭环控制[J]. 中国科学, 1998, 28(3): 232-237.
- [10] 王震洲, 刘教民, 贺代春. 基于彩色 CCD 的三色法测量电弧温度场分布[J]. 河北科技大学学报, 2005, 6(1): 51-53.