

CO₂ 激光焊接 TC4 熔池红外光辐射信号与焊接参数的关系

Relation Between Molten Pool Infrared Radiation Signal and Welding Parameter During CO₂ Laser Welding of TC4

武汉理工大学材料科学与工程学院 高大新 于有生
中航工业北京航空制造工程研究所 段爱琴

[摘要] 利用 CCD 摄像机以及红外光辐射信号监测系统系统地研究了钛合金 TC4 激光焊接过程中红外光辐射信号的特征以及焊接线能量与熔池红外光辐射信号熔池面积的关系。研究表明,(1)对应整条焊缝,红外光辐射信号可明显分为 3 个阶段,分别对应焊接起始阶段、准稳态阶段及焊接收弧阶段;(2)当线能量增加(功率不变焊接速度降低)时,熔池面积变大,红外光辐射信号相对强度随之增强;(3)熔池面积与红外光辐射信号相对强度之间存在相同的变化规律,因此利用红外光辐射信号可以相当准确地监测焊接过程的熔池面积变化,进而监测焊接过程的稳定性。

关键词: 激光焊接 钛合金 熔池 红外光辐射

[ABSTRACT] CCD camera and infrared radiation monitoring system are used to systematically study the influences of the heat input on the relative intensities of the infrared radiation and the area of molten pool during laser welding of TC4. The results show that the relative intensities of the signal can be obviously divided into three phases for the whole weld seam: the starting state of welding, the quasi-stable state, and the arc suppressing of welding. When the laser power keeps constant with welding speed decreasing, the area of molten pool increases, meanwhile the relative intensity of infrared radiation signal increases. Results indicate that there are the same varying rules existing between molten pool and relative intensities of infrared radiation. Thereby, changes about the area of molten pool can be monitored quite exactly, and the stability of welding process can be monitored by using infrared radiation signal.

Keywords: Laser welding Ti-alloy Molten pool Infrared radiation

高强钛合金是航空航天领域重要的结构材料,对飞行器减重起着重要作用,而焊接是提高材料利用率、充分发挥结构减重效率、降低制造成本的有效途径之一。

激光焊接具有能量集中、焊缝成形好、焊件变形小、操作简单、生产效率高等优势,非常适合焊接各种厚度的钛合金材料,已成为钛合金焊接的主导方向。

钛合金激光焊接技术的广泛使用,使之对焊接质量的检测与控制成为国内外重要的研究方向之一。在激光深熔焊过程中,最显著和最易观察到的现象是强光辐射以及声音。由于这些声光信号反映了激光焊接过程,并与焊接质量具有一定的相关性,因而利用声、光等信号来监测焊接质量成为一个重要的研究方向。早期利用红外和紫外传感器进行激光焊接过程研究的有 W.M.Steen、H.B.Chen、D.J.Brookfield and K.Williams^[1]等,主要是利用红外光和紫外光的强度来识别几种焊接状态,其中包括满足质量要求的焊缝、存在表面缺陷的焊缝、未焊透缺陷,其结果表明红外光及紫外光在实时监测焊接质量上具有优势。P.G.Sanders 等^[2-3]研制了一种用于监测焊接熔透性的红外传感器,完全穿透时低频红外光信号强度突然减小,红外光信号强度与穿透深度之间有线性关系。而 S.Postma 等^[4]在红外光传感器系统的研究上获得了相同的结果。本课题以典型航空钛合金 TC4 为对象,通过对实际焊接过程中熔池正背面图片和红外光辐射信号相对强度的测量,研究了红外光辐射信号相对强度与熔池面积的关系,以及红外光辐射信号相对强度与焊接参数的关系。

1 试验材料及设备

本课题以 2mm 厚的 TC4 钛合金作为研究对象,试验采用 CO₂ 激光快速轴流系统设备、Q-Mode、额定功率 4kW、连续,同轴保护气体为氩气。利用自主研发的激光焊接质量稳定性实时监测系统采集熔池正背面红外光信号,采集时保持红外光传感器与焊接头同步运动,同时利用 CCD 摄像机对焊接过程的熔池正背面图像进行记录。

焊接长度均为 100mm,按照表 1 工艺参数保持激光功率 $P=1600W$ 不变,仅改变焊接速度,研究其对红外光辐射信号及熔池面积的影响。

表1 焊接工艺参数

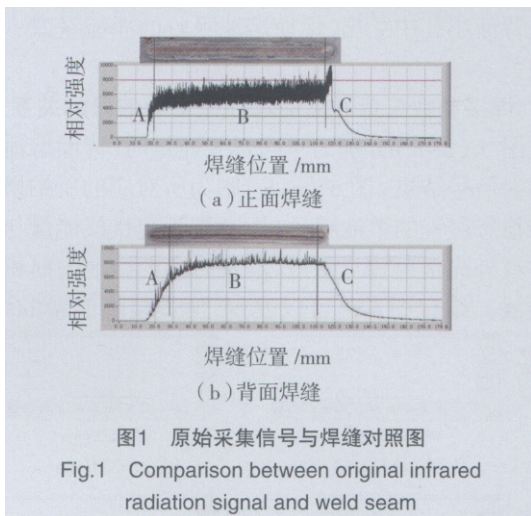
| 编号 | a | b | c | d | e | f | g | h |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 激光功率 P/kW | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 |
| 焊接速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$ | 3.5 | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.2 | 1.0 | 0.8 |
| 线能量 $J/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-1})$ | 27 | 32 | 38 | 48 | 64 | 80 | 96 | 120 |

2 试验结果与分析

2.1 CO_2 激光焊接 TC4 时红外光辐射信号特征与分析

2.1.1 正面焊缝原始红外光辐射信号特征

图 1 (a) 为焊接速度 1.0 m/min 时, 从熔池正面采集到的红外光辐射信号相对强度(纵坐标)与焊缝位置(横坐标)的相关曲线, 以及对应的焊缝外观状况。首先, 从图中可以发现, 红外光信号明显可分为两部分, 即波动部分和直流部分。研究^[5]还表明, 波动部分主要是由金属蒸汽 / 等离子体的热辐射所造成的, 而直流部分则主要由熔池的热辐射造成。其次, 沿焊缝方向信号明显



可分为 3 个阶段: A 为焊接起始阶段, 此时, 红外光辐射信号的相对强度快速地从 0 上升到一定高度; B 为焊接准稳态过程, 呈缓慢增加趋势, 但是在整个焊接过程中, 变化相当小, 这种缓慢上升主要是由焊缝的低温区域辐射所引起的; C 为焊接收弧阶段, 此时信号强度快速增加, 然后快速减小, 最后缓慢减小到趋近零点。信号强度的增加主要是由于收弧时, 焊接速度的减少所造成的结束点熔池面积增加。其对应的焊缝正面形貌在结束时形成一个凹坑下榻, 也证实了这一点。而其下降阶段表明焊缝的逐渐冷却过程, 与所测得的热循环曲线极为相似^[6]。

2.1.2 背面焊缝原始红外光辐射信号特征

焊接速度 1.0 m/min 时, 从熔池背面采集到的红外光辐射信号相对强度(纵坐标)与焊缝位置(横坐标)的相关曲线, 以及对应的焊缝外观状况如图 1 (b) 所示。

同样, 信号明显可分为两部分, 即波动部分和直流部分。信号波动性与焊缝正面相比变小, 这是由于背面金属蒸气 / 等离子体不及正面强烈, 所形成的差别, 而直流部分则主要由熔池的热辐射造成。从图中可以发现, 其亦可分为 3 个阶段: A 为焊接起始阶段, 此时, 红外光辐射信号的相对强度从 0 上升到一定高度; B 为焊接准稳态过程, 信号上升到某值后便趋于稳定, 在该阶段基本不变; C 为焊接收弧阶段, 此时信号缓慢减小到趋近零点。与正面信号比较, A 和 C 阶段信号上升和降低时斜率小, B 阶段亦不存在缓慢上升, 可见背面辐射信号相对于正面较迟缓, 信号上升和降低的速度较正面均偏慢, 在焊接结束时不像正面有一段增长, 在焊缝外观上也没有熔化区增大现象。

2.2 焊接参数与正面熔池红外光辐射信号的关系

文献 [5] 研究表明, 激光焊接钛合金时金属蒸气 / 等离子体区是一个以 1kHz 以上频率波动的过程, 为排除其干扰, 得到熔池区域的热辐射, 下文应用于研究的曲线为经数字滤波处理, 取均值得到统计分析曲线。

首先研究正面焊缝的结果, 图 2 (a~h) 分别为不同焊接线能量时, 正面熔池红外光辐射信号结果; 图 3 (a~h) 为相应的所拍摄的焊接准稳态过程的熔池图片。图 4 则为焊接线能量与准稳态时红外光辐射相对强度, 以及对应的熔池的面积的相关曲线。结合图 2~4 可以发现, 随焊接线能量的增加, 正面熔池长、宽和面积均增大, 对应的辐射信号亦增强。

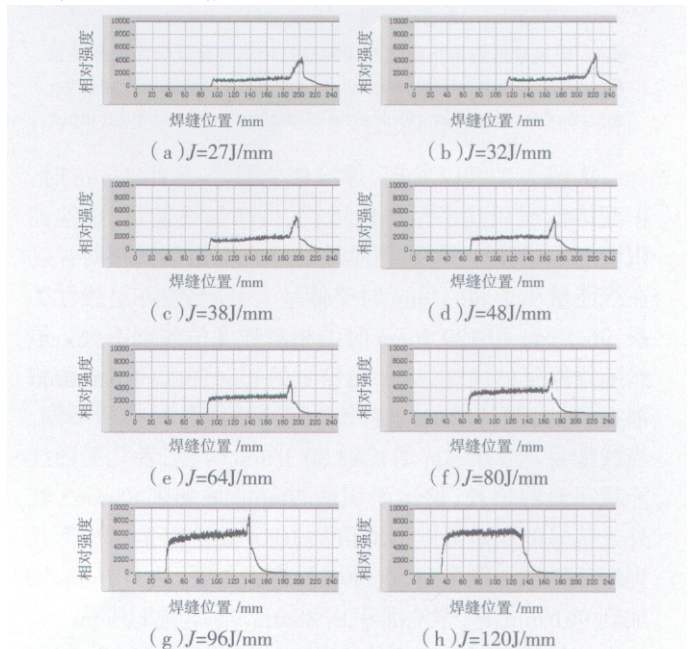


图2 不同焊接线能量时正面熔池辐射信号相对强度与焊缝位置的相关曲线

Fig.2 Distribution of relative intensities of infrared radiation signal of front molten pool with weld position at different heat input

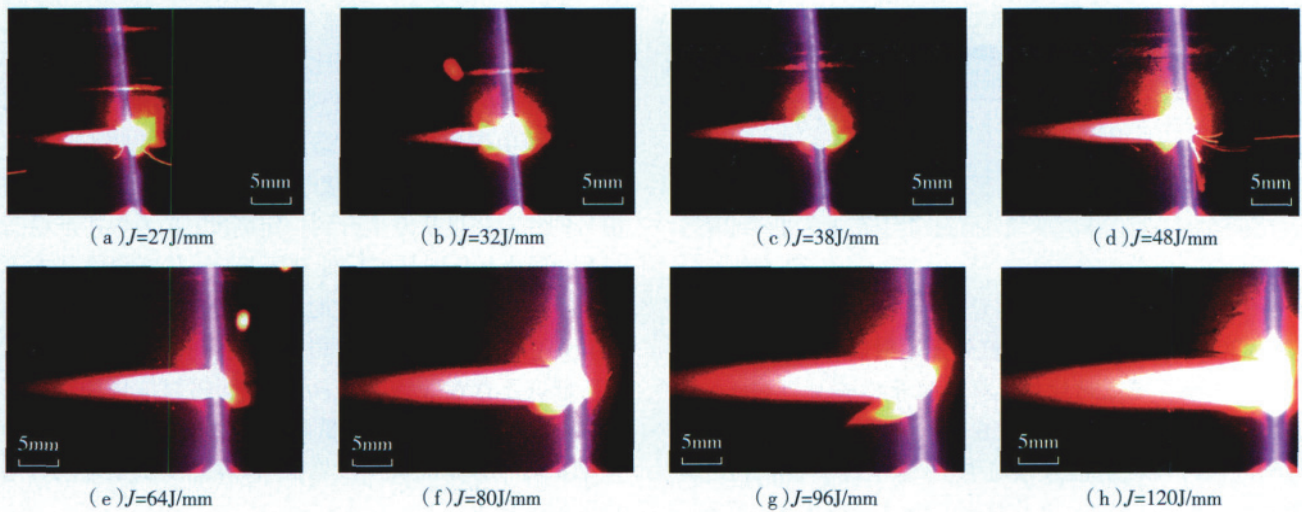


图3 不同焊接线能量时正面熔池图片
Fig.3 Images of front molten pool at different heat input

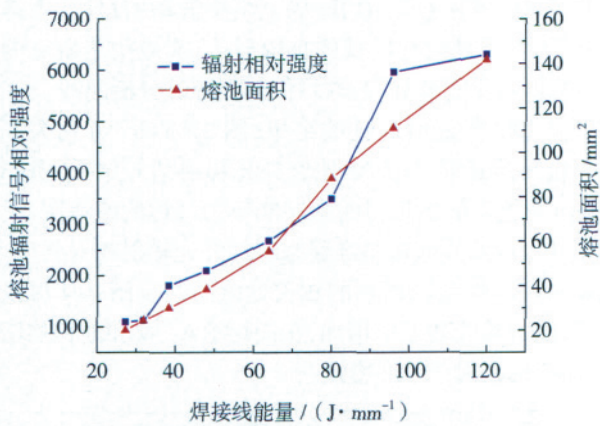


图4 焊接线能量与正面熔池辐射信号相对强度及熔池面积关系
Fig.4 Relation among relative intensities of infrared radiation signal of front molten pool, area of molten pool and heat input

从图 2~4 可以发现,焊接线能量小于 80 J/mm 时,正面熔池面积几乎呈线性增长,再增加线能量,熔池面积增加的趋势变缓,而相应地红外光辐射信号相对强度在线能量小于 80 J/mm 时整体呈上升趋势,亦呈线性关系,96 J/mm 和 120 J/mm 时的相对强度值差别不大。虽然随线能量的增加,红外光信号的相对强度和熔池面积都在增加,但是增加的速率在不同线能量时有所不同。当线能量从 27J/mm 增长到 80 J/mm 时,二者几乎随线能量呈直线增长,熔池面积从 20mm² 增加到 88mm²,红外光信号的相对强度平均值从 1088 增长到 3480。但是当继续增加线能量时,这种增加趋势变缓,从 80J/mm 增加到 96J/mm 时,熔池面积从 88mm² 增加到 110mm²,红外光信号的相对强度平均值从 3480 增长到 5957。线能量 96J/mm 增加到 120J/mm 时,熔池面积从 110mm² 增加到 141mm²,红外光信号的相对强度平均值从 5957 增长到 6302。

这种当线能量增加到一定值后,熔池面积及辐射强度增加趋势变缓的现象,与此时熔透性增加,部分线能量从背面小孔中穿出,促使熔池吸收的净能量减少的现象相关。

2.3 焊接参数与背面熔池红外光辐射信号的关系

图 5 (a~h) 分别为不同焊接线能量时,背面熔池红外光辐射信号结果;图 6 (a~h) 则为所对应的所拍摄的焊接准稳态过程的熔池图片;图 7 则为焊接线能量与准稳态时红外光辐射相对强度,以及对应的熔池的面积的相关曲线。结合图 5~7 可以发现,随焊接线能量的增加,

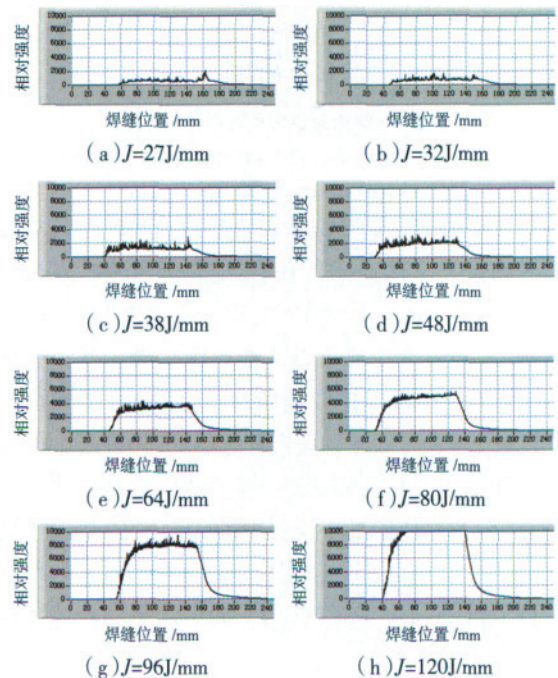


图5 不同焊接线能量时背面熔池辐射信号相对强度与焊缝位置的相关曲线

Fig.5 The distribution of the relative intensities of infrared radiation signal of back molten pool with weld position at different heat input

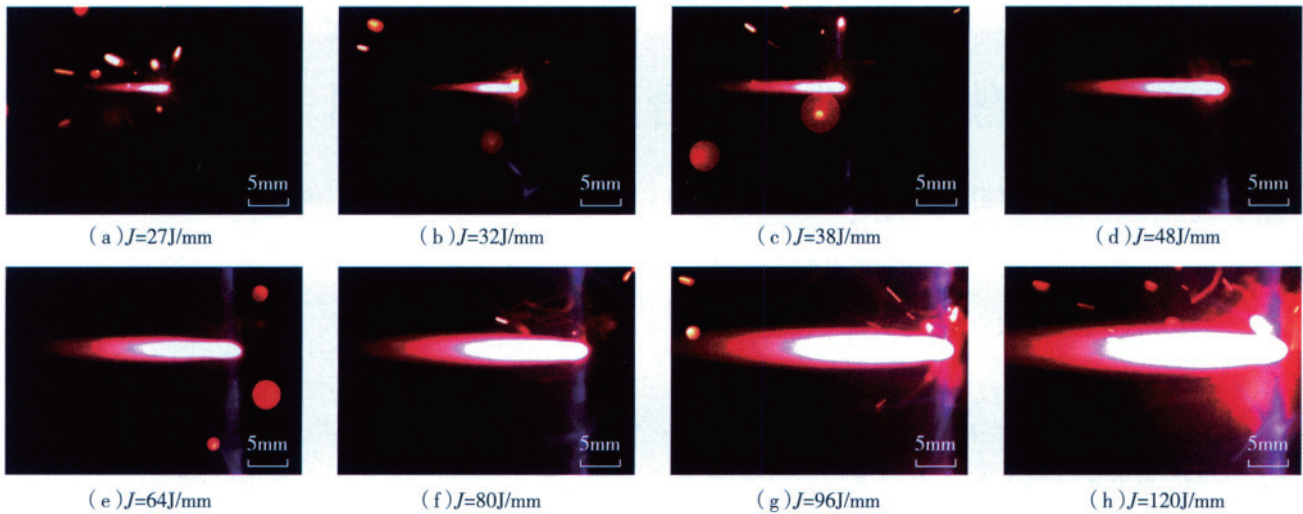


图6 不同焊接线能量时背面熔池图片

Fig.6 Images of back molten pool at different heat input

背面熔池长、宽和面积均增大,对应的辐射信号亦增强。

从图 5~7 可以发现,焊接线能量小于 48J/mm 时,正面熔池面积几乎呈线性增长,再增加线能量至 64J/mm 时,熔池面积增加的趋势变缓,再增加至 80J/mm 和 96J/mm 时,斜率又开始增大。而相应地红外光辐射信号相对强度在线能量小于 80J/mm 时整体呈上升趋势,亦呈线性关系,80J/mm 和 96J/mm 时斜率变大,120J/mm 时出现饱和。虽然随线能量的增加,红外光信号的相对强度和熔池面积都在增加,但是增加的速率在不同线能量时有所不同。当线能量从 27J/mm 增长到 80J/mm 时,二者几乎随线能量呈直线增长,熔池面积从 6mm^2 增加到 60mm^2 ,红外光信号的相对强度平均值从 704 增长到 4914。但是当继续增加线能量时,这种增加趋势变缓,从 80J/mm 增加到 96J/mm 时,熔池面积从 61mm^2 增加到 96mm^2 ,红外光信号的相对强度平均值从 3480 增长到 5957。线能量从 96J/mm 增加到 120J/mm 时,熔池面

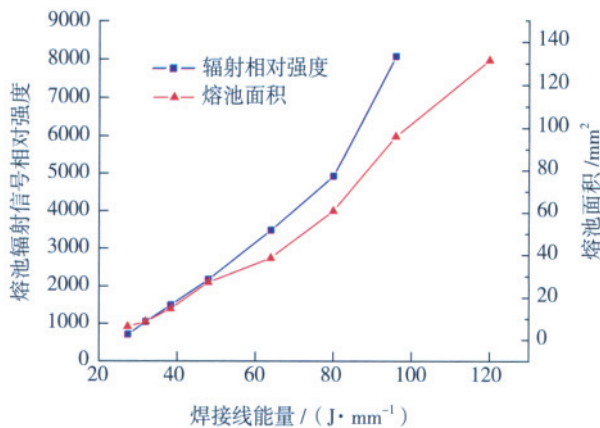


图7 焊接线能量与背面熔池辐射信号相对强度及熔池面积关系
Fig.7 Relation among relative intensities of the infrared radiation signal of back molten pool, area of molten pool and heat input

积从 96mm^2 增加到 131mm^2 ,红外光信号的相对强度平均值从 8053 变至饱和。

在线能量小于 48 J/mm 时红外光辐射信号出现波动性,这与线能量输入不够,焊接状态不连续有关。背面熔池也存在当线能量增加到一定值后,熔池面积及辐射强度增加趋势变缓的现象,与此时熔透性增加,部分能量从背面小孔中穿出,促使熔池吸收的净能量减少的现象相关。

3 结论

(1) 在本课题的试验条件下,可以发现:测量所得红外光辐射信号清楚地表征了熔池和金属蒸气 / 等离子体热辐射结果。它同时清楚地表征出了焊接的 3 个阶段,即焊接起始阶段、焊接准稳态阶段和焊接收弧阶段。

(2) 试验结果表明,当增大焊接线能量时,正背熔池面积均变大,正背面熔池红外光辐射信号相对强度均明显增强。但当线能量增大到一定值时,它们增加的趋势变缓。

(3) 研究结果表明,随着线能量增加,红外光信号的相对强度与熔池面积具有相当一致的变化趋势,因此,在实际焊接中用红外光信号强度来监测熔池的面积及稳定性,进而监测焊接过程的稳定性,具有相当的可行性。

参考文献

[1] Steen W M, Chen H B, Brookfield D J, et al. Laser process monitoring with dual wavelength optical sensors// Proceedings of ICALEO' 91. San Jose, CA, 1991, 74: 113-122.

[2] Sanders P G, Keske J S, Leong K H, et al. Capabilities of infrared

(下转第 98 页)

“套孔法”。

2.3 激光脉冲宽度和精度分辨率的测量

通过波形探测器对激光进行光电转换,然后使用波形显示器进行测量。通过波形显示器观察并测量脉冲波形和脉冲宽度,并根据显示器的读数计算出脉冲宽度误差。

2.4 激光光斑的显示

激光光斑分析仪位于 F 的另一个共轭焦点 F' 处,在激光辐射器的调试过程中,可以随时监视激光光束远场光斑,方便调试。

2.5 激光光轴稳定性和光束质量测量

测试光轴的稳定性时,利用激光光束的分析系统自动测试系统完成光轴稳定性测试,并测出三维光强图像。

2.6 激光光轴与安装基准偏角测量

首先在安装调试设备时,用基准直角反射镜调自准直平行光管的光轴,使 CCD 中心与自准直平行光管分划中心重合,其次,按基准安装激光器产品。启动激光光源使激光器正常工作,激光器输出的动态激光通过双不胶物镜聚焦在其焦平面上,聚焦光斑打在 CCD 上。通过 CCD 成像,利用软件中的激光光轴与安装基准面偏角测量子模块进行图像处理,测量并计算出聚焦光斑中心与 CCD 中心偏差,从而完成激光光轴对安装基准面偏角的测量。

3 精度分析

3.1 激光光轴和安装基准轴夹角测量误差分析

激光光轴和安装基准轴夹角测量误差设为 σ ,则

$$\sigma = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 + \alpha_4^2 / (n - 1)}, \quad (3)$$

式中, α_1 为光斑基准定位误差;设靶十字线 s 中心与光斑中心的测量误差 $\delta=0.02\text{mm}$,物镜焦距 $f'=1500\text{mm}$,则

$$\alpha_1 = \arctan(0.02/1500) = 2.8''; \quad \alpha_2 \text{ 为基准夹具加工}$$

装夹误差,要求 $< 5''$; α_3 为基准直角反射镜加工误差,要求 $< 5''$; α_4 为自准仪自准直测量误差,仪器误差为 $3''$,代入以上数据,计算得

$$\sigma = \sqrt{(7.8 + 25 + 25 + 9)/(4 - 1)} = 4.7''。$$

计算结果小于技术指标要求,所以满足测试精度要求。

3.2 套孔法发散角测量允许误差分析

发散角测量误差设为 ε ,则

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2}{(n - 1)}}, \quad (4)$$

式中, ε_1 为基准夹具加工装夹误差,要求 $< 5''$; ε_2 为基准直角反射镜加工误差,要求 $< 5''$; ε_3 为光轴稳定度,要求 $\leq 3''$; ε_4 为小孔对中误差,设小孔重复定位精度为 0.01mm ;物镜焦距 $f'=1500\text{mm}$,则 $\varepsilon_4 = \arctan(0.01/1500) = 1.4''$ 。代入以上数据进行计算得 $\varepsilon = 4.5''$ 。

计算结果表明,测量的误差很小,可以满足使用要求。

4 结束语

随着激光及光电子技术的发展,激光器的应用也越来越广泛,其性能特性被越来越多地关注,因此研制优良、准确度高的激光性能测试设备是必要的。本项激光性能测试设备的研制和设计,对开发实用的和商品化的激光性能综合测试设备有实际的指导意义。测试设备采用成熟的商用设备,以提高系统的稳定性和测试成功率。在满足功能要求的前提下,优化测试光路,降低测试设备的数量和成本,提高性价比。目前该设备已投入使用,工作状态良好。

参考文献

- [1] Fang Qiwan, Chen zhaohui. Study on trans-mission loss in extinction test .SPIE, 1996, 2889:288-290.
- [2] Zhang Zaixuan, Chen Qing gen. The ability of measurement distance of lowe cost mini-LD laser rangfinder and the signa lnoise SNR of system .Aeta Photonica Siniea, 1998, 27(10):944-947.
- [3] Fang Qiwan, Rao Jionghui, Ying Zhi xiang. New determination equation for visibility. SPIE, 1996, 2889:292-293.
- [4] Chen Zhibin, Liang Yan, Long Shulin, et al. Computerized testing equipment to the resolution of night vision instrument with faintlight . SPIE, 2002, 4927:438-445.
- [5] 金国藩, 李景镇. 激光测量学. 北京: 科学出版社, 1998. 162~165.

(责编 晓立)

(上接第 95 页)

weld monitor// Proceedings of ICALEO' 97, San Diego, CA, 1997, C1-C10.

[3] Sanders P G, Leong K H, Keske J S, et al. Real-time monitoring of laser Beam welding using infrared weld emissions. J Laser Appl, 1998, 10: 205-211.

[4] Postma S, Aarts R, Meijer J. Penetration detection in Nd:YAG laser welding of sheet metal by optical sensors// Proceedings of ICALEO' 00, Dearborn, MI, 2000, E44-E51.

[5] 段爱琴, 陈俐, 丁立民. YAG 激光焊接钛合金 TA15 熔池特征. 航空制造技术, 2009(10): 73-76.

[6] Duan Aiqin, Chen Li. Characteristics of keyhole and molten pool during laser welding of TC4 Ti-alloy// Proceedings of the 36th International MATADOR Conference. Manchester, UK, 2010: 591-594.

(责编 良辰)