

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0354-03

# 激光加工温度场 CCD 检测中的温度标定

陈娟, 杨洗陈\*, 雷剑波, 王云山

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 激光加工温度场的检测对实现激光加工智能化有重要的实用价值。根据比色测温原理, 提出采用彩色 CCD 和计算机图像处理相结合检测激光加工温度场的实验方案, 研究 CCD 比色测温的温度标定。采用 BF1400 和 BBR1000 型国家标准黑体炉作为温度标定仪器, 用 WV-CP474 型 CCD 相机在标定温度范围 700~1400 °C 时, 每隔 100 °C 拍摄黑体炉靶面图像。开发了基于 VC++ 的温度场图像处理专用软件, 并对 CCD 拍摄的图像进行处理, 建立了温度与比色值的数学关系表达式, 并给出了待定系数。结果表明: CCD 测温数据与现行标准测温数据之间存在良好的对应关系, 进一步发展后, 可成为激光加工温度场检测的有效手段。

**关键词** 激光技术; 温度场; 温度标定; 熔池; 比色测温; CCD

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

## Calibration Study on Measurement of Temperature Field in Laser Processing by CCD

CHEN Juan, YANG Xi-chen, LEI Jian-bo, WANG Yun-shan

(Laser processing center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract** It was important in measuring temperature field in laser processing for laser intelligence process. The measurement of temperature field in laser processing by color CCD camera and computer image technology was presented in this paper, and which is focused on the calibration of CCD colorimetric method. BF1400 and BBR1000 standard blackbody furnace and WV-CP474 CCD were used in this method. The images of temperature of blackbody furnace had been taken in step of 100 °C from 700 °C to 1400 °C. Special program based on VC++ had been developed to process the images, and the relationship between colorimetric level and temperature had been established. It was shown that a good agreement between testing data and real data, and it will be a useful method for measurement of temperature field for laser process after developed.

**Key words** laser technique; temperature field; temperature calibration; molten pool; colorimetric method; CCD

### 1 引言

激光加工已在生产中获得广泛应用, 开展激光加工温度场实时检测对实现激光加工智能化具有重要意义<sup>[1~4]</sup>。采用工业电荷耦合器件(CCD)与计算机图像处理技术相结合的方法, 检测高温物体温度场已在冶金能源等领域获得初步应用<sup>[5~6]</sup>, 国内已有采用 CCD 检测激光加工温度场的初步报道<sup>[7~8]</sup>。

利用比色测温方法检测温度场的关键环节是对比色测温公式中待定系数的标定, 标定结果的好坏直接影响测温精度。在目前的高温物体检测研究工作中主要采用标准钨灯、黑体炉进行标定。但是, 对

于激光加工的测温标定还没有开展较多的研究。本文提出了一种激光加工温度场 CCD 检测的温度标定方法。采用国家标准黑体炉作为标定仪器, 用彩色 CCD 摄像机拍摄黑体炉内一系列温度的热辐射图像, 应用自主开发的图像处理软件对拍摄图像进行处理, 建立起比色值与温度的对应关系, 从而确定待定系数的大小。

### 2 测温原理

建立比色测温公式的基础是黑体辐射定律。对于灰体, 黑体辐射定律是适用的, 但要考虑发射率  $\epsilon$

**基金项目:** 国家自然科学基金(60478004)和天津市科委重点攻关项目(033188011)资助课题。

**作者简介:** 陈娟(1981-), 女, 天津人, 硕士研究生, 主要从事激光加工的研究。E-mail: chen24juan@126.com

**导师简介:** 杨洗陈(1941-), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与材料相互作用和激光加工理论及应用方面的研究。

\* 通信联系人。E-mail: yangxich@126.com

的影响,即对灰体而言普朗克定律为<sup>[8]</sup>

$$M(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}, \quad (1)$$

其中  $M(\lambda, T)$  为波长为  $\lambda$ , 温度为  $T$  的光谱辐射出射度;  $\epsilon(\lambda, T)$  为发射率;  $C_1$  为普朗克第一辐射常数;  $C_2$  为普朗克第二辐射常数。

在红外波段进行测温的方法已较成熟,但在激光加工中,由于  $\text{CO}_2$  激光器的工作波长为  $10.6 \mu\text{m}$ , 属

红外波段范围,所以为避开干扰,选用的是可见光彩色 CCD 相机。它通过设置在面阵光电元件靶面间的滤波器获得可见光范围内的三个色度信号,可以取三色中的任意两色进行比色测温。

在温度小于  $2000 \text{ K}$ 、波长小于  $1000 \text{ nm}$  时,用维恩公式代替普朗克公式,其误差不大于  $0.1\%$ 。以 R 和 G 通道为例,可得到比色测温公式

$$T = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} \right)}{\ln R_{rg} - \ln \frac{A_r \mu_r t_r K_{\lambda_r} E(\lambda_r)}{A_g \mu_g t_g K_{\lambda_g} E(\lambda_g)} - \ln \frac{\epsilon(\lambda_r, T)}{\epsilon(\lambda_g, T)} - 5 \ln \left( \frac{\lambda_g}{\lambda_r} \right)}, \quad (2)$$

其中  $A$  为 CCD 光敏单元输出电流和图像灰度值之间的转换系数,  $\mu$  为光电转换系数,  $t$  为相机曝光时间,  $K$  为光学系统透过率,  $R_{rg}$  为红色与绿色比色值。设 CCD 在  $\lambda = [380\text{nm}, 780\text{nm}]$  的可见光谱响应函数是  $E(\lambda)$ , 被测对象为激光加工辐照金属, 可看成灰体(黑体系数不随波长变化)。即便假设不成立,  $\epsilon(\lambda_r, T)$  和  $\epsilon(\lambda_g, T)$  是在物体温度、材料、形状、拍摄条件等情况均相同, 仅波长不同情况下的黑度系数, 其比值也是比较接近 1 的, 所以设  $\frac{\epsilon(\lambda_r, T)}{\epsilon(\lambda_g, T)} = 1$ , 则比色测温公式可简化为

$$T = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} \right)}{\ln R_{rg} - \ln \frac{A_r \mu_r t_r K_{\lambda_r} E(\lambda_r) \lambda_r^5}{A_g \mu_g t_g K_{\lambda_g} E(\lambda_g) \lambda_g^5}}, \quad (3)$$

其中  $\ln \frac{A_r \mu_r t_r K_{\lambda_r} E(\lambda_r) \lambda_r^5}{A_g \mu_g t_g K_{\lambda_g} E(\lambda_g) \lambda_g^5}$  为待定系数, 需要进行标定。

### 3 标定实验

黑体炉是与理想黑体较为接近的热辐射器, 因此采用黑体炉标定比色测温公式中的待定系数。标定的目的是通过黑体炉标准温度建立起图像灰度值和温度的对应关系, 求出拟合函数, 从而确定待定系数的大小。

#### 3.1 标定设备

标定系统是由中国计量科学研究院国家标准黑体炉 BBR1000 和 BF1400、WV-CP474 型 CCD 摄像机、DS-4001H 图像采集卡、PC 机(操作系统 Windows 2000)组成, 如图 1 所示, 图 2 为 CCD 标定图。

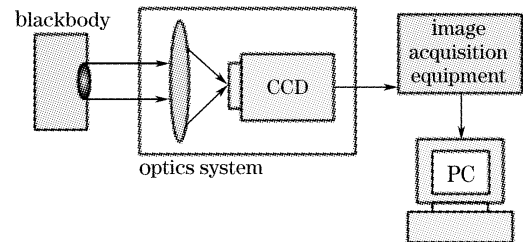


图 1 标定过程示意图

Fig. 1 Sketch map of calibration process

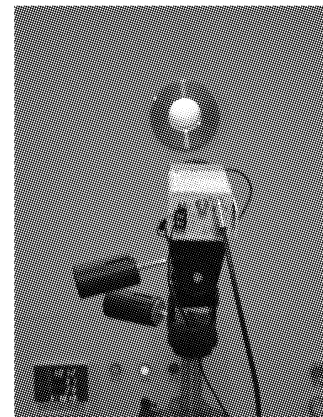


图 2 CCD 标定图

Fig. 2 Picture of CCD calibration

#### 3.2 标定方法

针对激光加工温度场的温度特性, 设计标定温度范围在  $700 \sim 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据现场实验设备用 BBR1000 黑体炉标定  $700 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 用 BF1400 标定  $1000 \sim 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

标定前在  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  预热黑体炉  $24 \text{ h}$ , 然后从  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  开始, 每隔  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  记录一次数据, 即用 CCD 拍摄黑体炉靶面图像, 存储于计算机中。由于 CCD 相机自身性能所限, 随着温度的升高拍摄物体亮度增加, 可能出现饱和现象, 因此, 采用设置不同的相机曝光量, 同时缩小光圈, 在镜头前添加衰减片的方法, 减

小饱和度。

在标定实验中,随着黑体炉温度的升高,调整快门,减小曝光时间,调换衰减片,降低透射率,确保图像不饱和。在室温 22℃,相对湿度 20% 的条件下,采集不同温度时黑体炉靶面图像,如图 3 所示。

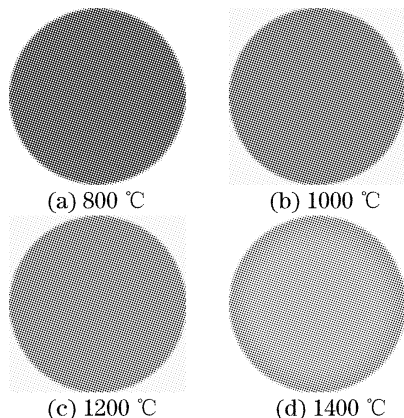


图 3 黑体炉不同温度下的靶面图像

Fig. 3 Radiation images of blackbody at different temperature

开发出基于 Visual C++ 专用图像处理软件,对拍摄图像进行去除噪声、阈值分割、缩放裁剪等处理,通过提取图像中的 RGB 三色灰度值,建立温度与比色值的关系。

### 3.3 实验数据及处理方法

通过标定数据可见,温度  $T$  与比色值  $R_{12}$  有比较好的对应关系,可以采用最小二乘法对实验数据进行拟合,拟合公式为

表 1 黑体炉的实际温度与拟合计算值对照

Table 1 Comparison of practical temperature and calculated temperature of blackbody furnace

Real grey level ratio	Real temperature / °C	Fitting temperature / °C	Error / °C
2.3556	700	698.25	1.75
2.5472	800	812.95	-12.95
2.7188	900	915.55	-15.55
2.8259	1000	979.65	20.35
3.0000	1100	1083.75	16.25
3.1951	1200	1200.45	-0.45
3.3528	1300	1294.85	5.15
3.5510	1400	1413.35	-13.35

$$T = \frac{66684699}{\ln R_{12} + (2.6048R_{12}^2 - 19.6925R_{12} + 40.6225)}, \quad (4)$$

其中待定系数涵盖在拟合公式中,由拟合公式求得温度与黑体炉标准温度对比,统计数据如表 1 所示。

## 4 结 论

提出了激光加工温度场 CCD 检测的标定方法,开发出专用的图像处理软件,完成了标定实验,并通过软件对实验图像进行了图像处理,建立了温度与灰度的关系式。结果表明,实验得到的 CCD 测温数据与现行测温数据之间存在着良好的对应关系,可成为激光加工温度场检测的有效手段。

## 参 考 文 献

- 1 Sankaranarayanan Srikanth, Guo Wen, Kar Aravinda. Characteristics of laser-fabricated metal structures [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1998, 13(4): 537~554
- 2 Yanmin Li, Haiou Yang, Xin Lin *et al.*. Laser direct forming of metal components: technical characterizations [C]. *SPIE*, 2002, 4915: 395~402
- 3 A. von Busse, M. Fargas, O. Meier *et al.*. Process monitoring using direct visualization of the weld seam for laser transmission welding of plastics [C]. *Proc. Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, 2005. 149~154
- 4 G. Bi, A. Gasser, K. Wissenbach *et al.*. Temperature easurement and its application for monitoring and control in laser cladding [C]. *Proc. Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, 2005. 143~148
- 5 Zhou Huaichun, Lou Xinsheng, Xiao Jiaofang *et al.*. Experimental study on image proceeding of flame temperature distribution in a pilot-scale furnace [J]. *Proc. CSEE*, 1995, 15(5): 295~300  
周怀春, 娄新生, 肖教芳 等. 炉膛火焰温度场图像处理试验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 1995, 15(5): 295~300
- 6 Wang Fei, Xue Fei, Ma Zengyi *et al.*. Measurement of flame temperature distribution via two color information on color CCD [J]. *Power Equipment*, 1998, 13(6): 2~5  
王 飞, 薛 飞, 马增益 等. 运用彩色 CCD 双色信息测量燃烧火焰的温度场 [J]. *发电设备*, 1998, 13(6): 2~5
- 7 Zhuang Hua, Pan Jinluan, Liao Baojian. Study on real-time measurement for temperature field by images colorimetric method [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 1998, 34(2): 1~7  
张 华, 潘际奎, 廖宝剑. 图象比色法温度场实时检测的研究 [J]. *机械工程学报*, 1998, 34(2): 1~7
- 8 Lei Jianbo, Yang Xichen, Wang Yunshan *et al.*. Study on CCD measurement of temperature field in laser molten pool [C]. *SPIE*, 2005, 5629: 546~556