

文章编号: 1001-3806(2011)03-0315-04

基于 CCD 的激光熔覆熔池宽度的在线检测研究

杨柳杉^{1,2}, 刘金水², 刘继常^{1*}, 伍耀庭³, 王迎丽^{1,4}

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点试验室, 长沙 410082; 2. 湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082; 3. 广汽长丰汽车股份有限公司永州分公司, 永州 425001; 4. 湖南长丰汽车研发股份有限公司, 长沙 410014)

摘要: 为了研究激光熔覆熔池尺寸, 采用 CCD 摄像机和 VISUAL C++ 平台自主开发的图像处理软件, 建立了一套针对激光熔覆熔池宽度的在线检测系统, 提取了熔池边缘和几何特征参量, 通过标定试验测定系统的校正系数, 在线获取了熔覆层的宽度。结果表明, 该系统能比较准确地实现熔池宽度的在线检测, 为实时检测激光熔覆熔池表面质量提供了一个有效的工具。

关键词: 激光技术; 激光熔覆; 在线检测; CCD; 图像处理; 熔池

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.008

Study on CCD-based detection system for online monitoring of melt pool width in laser cladding

YANG Liu-sha^{1,2}, LIU Jin-shui², LIU Ji-chang¹, WU Yao-ting^{1,3}, WANG Ying-li^{1,4}

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. GAC ChangFeng Motor Co. Ltd. Yongzhou Branch, Yongzhou 425001, China; 4. Changfeng Motor R&D Co. Ltd. Hunan, Changsha 410014, China)

Abstract: In order to study the size of melt pool in laser cladding, a system for monitoring the melt pool was constructed with a CCD camera and special image-processing software developed on VISUAL C++. The edge and geometric parameters of the melt pool were obtained in real-time. The width of the clad layer was obtained in time after calibration correction coefficients of the experimental detection system. Experiment results indicate that the width of melt pool can be detected accurately, and the presented system is useful for online detection of the clad quality.

Key words: laser technique; laser cladding; real-time measurement; CCD; image processing; melt pool

引言

激光熔覆是一种利用高能密度的激光束辐照后使粉末材料和基体表面一薄层同时熔化, 并快速凝固后与基体材料形成冶金结合的表面熔覆层, 可显著改善表面耐磨或耐腐蚀性能等。尽管激光熔覆优点很多, 但在实际运用中还有一定局限性。这不仅仅是的激光设备的费用相对高, 主要是因为激光熔覆过程中对干扰的高灵敏度, 例如: 基体表面对激光的吸收率的微

小变化都能引起熔池尺寸的大范围波动^[1-3]。

为了消除加工过程中各种干扰的影响, 得到高质量的熔覆层是实现激光熔覆闭环加工的重点和难点问题^[2]。在加工过程中, 常用于闭环控制的基本反馈信号是熔池的参量, 如熔池的形貌、温度等, 它间接反映出熔覆带的质量^[4-5]。就目前技术而言, 一般采用摄像机或光电晶体管在线检测熔池的形貌。但是, 使用这些设备的难点问题是激光熔覆过程中熔池图像容易受到粉末流、等离子体等的污染^[6-7]。

作者建立了一套基于工业电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 对熔池宽度的在线检测系统, 通过 VISUAL C++ 平台自主开发的数字图像处理软件消除噪声、粉末流等对熔池图像的影响, 快速有效地提取了熔池的特征参量, 实现了熔池宽度的在线检测。

1 试验系统及方法

试验基体材料为 45# 钢, 长度高尺寸为 100mm ×

基金项目: 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主课题资助项目 (60870005); 国家科技支撑计划资助项目 (2007BAF29B01); 教育部长江学者与创新团队发展计划资助项目 (531105050037); 粤港关键领域重点突破基金资助项目 (2007Z002); 广东省教育部产学研合作专项基金重点资助项目 (2008A090400017)

作者简介: 杨柳杉 (1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光熔覆检测控制的研究。

* 通讯联系人。E-mail: liujichang2003@sohu.com

收稿日期: 2010-07-29; 收到修改稿日期: 2010-08-23

30mm × 20mm。熔覆材料为 Fe55 合金粉末,激光功率 $P = 1100\text{W} \sim 1200\text{W}$,扫描速率 $v = 0.5\text{mm/s} \sim 6\text{mm/s}$,保护气体为氮气。

试验系统如图 1 所示。试验过程中,采用普通彩

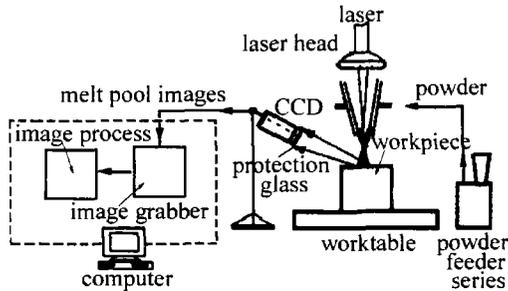


Fig. 1 Experimental system

色一体化 CCD 摄像机,固定在工作台面上,保证了 CCD 加工过程中与熔池之间的相对静止,激光头距离 CCD 水平距离为 35cm,镜头中心距离基体表面垂直高度为 15cm,镜头中心线与水平面的夹角为 30° ,由解码器实现 CCD 的电动变焦,为避免粉末飞溅以及激光束对镜头的损害,CCD 镜头前面加装中性衰减片,按比例对光线进行衰减。激光熔池反射的光经过中性衰减片,在光学摄像单元 CCD 上被转换成电信号,即模拟信号,经过图像采集卡实现模拟信号到数字信号的 A/D 转换,最后经过采集卡将视频数字化信号传输给计算机,在计算机上显示清晰流畅的熔池图像,通过以 VISUAL C++ 为平台自主开发的图像处理软件获取加工过程中熔池宽度,实现激光熔覆熔池宽度的在线检测。

2 试验过程

2.1 熔池图像的实时采集

驱动 CCD 摄像机,拍摄加工区域,激光熔池反射的光经过中性衰减片进入 CCD,经过采集卡将熔池图像传输给计算机并显示于屏幕上。未经过任何图像处理的熔池图像,由于背景为环境所反射的光,经过中性衰减片进入镜头的环境光很少,视场中形成黑色背景色,CCD 上接收的熔池光线很强在熔池图像中形成白亮区域,白亮区域周围散落的白点为粉末飞溅造成的。采集像素大小为 720 像素 × 576 像素,采集频率为 20 帧/s。

2.2 熔池图像的处理

加工过程中,为了获取较高质量的熔池图像,快速、准确地提取熔池的特征参量,排除来自烟雾、等离子体、粉末颗粒等对熔池图像的干扰和影响,需要对熔池图像进行一系列的处理^[8,9]。CCD 采集的熔池图像处理流程如图 2 所示。

2.2.1 裁剪与缩放 由于熔池尺寸一般为 1mm ~

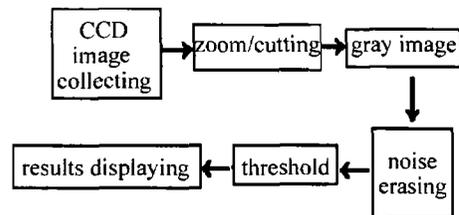


Fig. 2 Procedure of melt pool image processing

3mm,在实时摄像区所占区域较小,为便于观察将熔池区域进行裁剪和缩放,留取以熔池为中心的图像,改善熔池图像的视觉效果,但是不改变原来图像的大小。采集像素为 160 像素 × 120 像素,从实时摄像到裁剪与缩放不影响熔池图像信息。

2.2.2 灰度化 本试验中采用彩色 CCD,为了加快图像处理速度,减小检测的滞后性,改善熔池图像的画质,使熔池图像显示效果更加清晰,进行了灰度化处理。灰度图像与原图像一样,反映整幅图像的整体和局部的色度和亮度等级的分布和特征。本试验中采用加权平均法,按 $k_{\text{gray}} = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B$ 灰度变换函数,将对应着彩色中的 R, G, B (红、绿、蓝) 3 色分量信息以不同的权值进行加权平均,得到较合理的灰度图像,其中 k_{gray} 为经灰度化处理后原位置点的灰度值。

2.2.3 图像去噪声 熔池图像在采集、传输、数字化等过程产生的寄生效应,再加上基体对激光的反射、粉末飞溅的干扰,使得熔池图像有很强的叠加噪声,熔池图像噪声的抑制是获取熔池正确信息十分关键的问题,它影响熔池图像处理全过程及输出结果。在本试验条件下噪声表现出随机性的特点,且大多以点状形式呈现,所以采用处理速度较快的算术均值滤波。令 S_{xy} 表示中心 (x, y) 点,尺寸为 $m \times n$ 的矩形子图像窗口的坐标组,用 S_{xy} 定义的区域像素计算出来的算术均值来替代原像素值,即:

$$f(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{(s, t) \in S_{xy}} g(s, t) \quad (1)$$

式中, $g(s, t)$ 是给定含有噪声的图像。

考虑到数据分布的平衡性,选择 3×3 的矩阵区

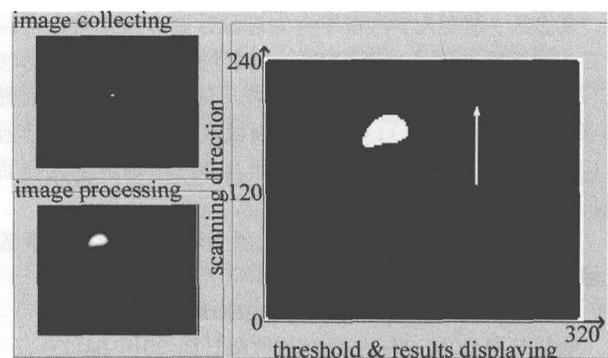


Fig. 3 Melt pool image process

域。从图3中可以观察到经过去噪声处理后的熔池的图像没有了周围的噪声和热影响区的影响。

2.2.4 阈值分割二值化 熔池图像经过前述预处理后, 希望将熔池区域从背景中提取出来, 分析熔池特征参量。根据熔池图像的灰度直方图的特点采用 Otsu 算法来度量像素间的均匀性获取最佳阈值。即将熔池图像目标场 C_1 和环境图像背景场 C_2 分为两大类, 属于同一类别的像素值分布具有均匀性, ω_1 和 ω_2 分别为 C_1 和 C_2 发生的概率(前期预处理后的像素数), 属于 C_1 和 C_2 的像素的灰度平均值为 μ_1 和 μ_2 , 方差 σ_1^2 和 σ_2^2 。使分离度 $\eta(T)$ 为最大值的 T 为最佳阈值:

$$\eta(T) = \frac{\omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2 + \omega_2(\mu_2 - \mu_T)^2}{\omega_1\sigma_1^2 + \omega_2\sigma_2^2} \quad (2)$$

式中, μ_T 为全局像素的灰度平均值。在熔池图像中, 凡灰度级大于 T 的, 颜色置为 255, 显示为黑色; 凡灰度级小于 T 的, 颜色置为 0, 显示为白色; 从图3中的阈值分割图可以观察到, 背景色和熔池之间有了明显的边界, 实现了熔池图像的二值化, 有利于熔池边缘的检测和提取。

2.2.5 边缘检测与提取 经过阈值分割的熔池二值图像进行轮廓提取, 采用掏空内部点的方法, 如果熔池图像中有某一点为白点, 且它的8个邻域点也都是白点, 则该点是内部点, 将该点删除。察看输入图像的每一个黑色像素点, 若该点周围8个邻域像素点的灰度值之和为0, 则该点是边界点, 输出图像相应位置为白色。最终的熔池图像处理界面如图3所示。

2.3 图像标定

激光熔覆宽度在线检测试验时, 由于 CCD 安装在熔池的侧面, 没有正对加工区域, 与熔池之间存在一定的拍摄角度, 导致熔池产生一定的变形, 采用试验标定的方法实现熔池图像的几何校正^[10]。图4为熔池正

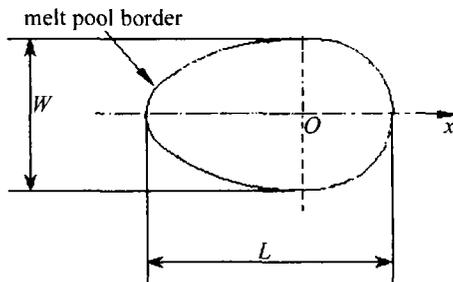


Fig. 4 Geometric parameters of melt pool

面几何参量示意图, x 为熔覆扫描方向, W 为熔池最大宽度, L 为熔池最大长度, α 为熔池后拖角。

整个图像处理过程中, 只改变了图像的像素, 而分辨率没有发生变化。所以, 根据 CCD 成像原理可以得知, 图像标定是指焦距、物距以及放大倍数不变的情况下, 提取的熔池特征像素所对应的实际尺寸。标定图

样选用对比度明显的黑白相间同心圆进行标定, 黑白同心圆半径差为 0.5mm。图5为标定模板图和实际拍摄图的对比。熔池图像的 W 宽度方向对应黑白同心圆的 x 方向。得到标定的比例系数 x 方向(垂直于扫描方向)为 35.6pixels/mm, 垂直方向(扫描方向)为 32.4pixels/mm。

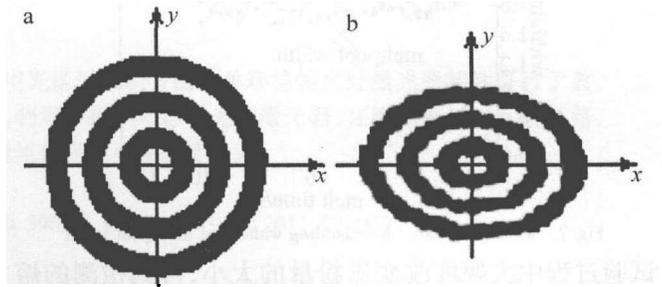


Fig. 5 a—template of calibration b—image of the template for calibration in the system

3 熔池宽度在线检测结果与分析

熔池几何参量与最终熔覆层几何尺寸及表面粗糙度有密切关系, 提取熔池特征信息有利于实现激光熔覆的闭环控制^[11]。通过熔池图像的处理和标定, 提取熔池宽度: (1) 采用逐行和逐列扫描熔池区域, 求得所有白点区域中 x 轴和 y 轴方向像素的最大值, 即为熔池宽度和长度的最大像素值; (2) 根据标定试验结果, 熔池宽度的像素值 \times 标定比例系数, 即为熔池宽度。

使用本系统对拍摄的视频图像进行处理, 得到送粉量在小范围内波动时熔池宽度的连续变化曲线, 如图6b所示, 激光功率 $P = 1200W$, 扫描速率 3.1mm/s, 图像采集频率为 20 帧/s, 图中熔池宽度值采用 8 帧图像的熔池最大宽度位置取平均值的方法确定。图6a为试验结束后熔覆带实物图。

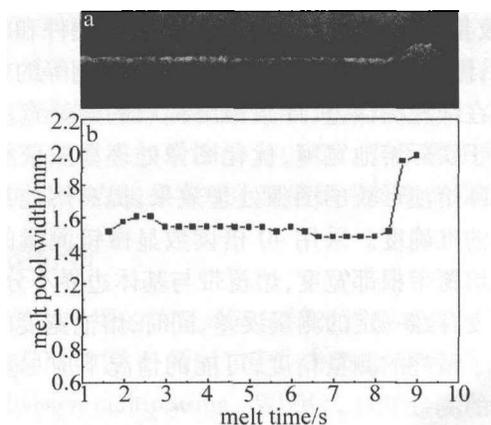


Fig. 6 a—actual clad b—width fluctuation of melt pool for time

由图6可以看到, 随着送粉量的小范围波动, 本套系统可以检测到熔池宽度, 且随着实际熔覆带宽度的改变, 熔池宽度发生相应的变化, 熔池宽度的变化与熔覆带宽度变化相似。

图7为激光功率 $P = 1200\text{W}$ 、扫描速率 1.6mm/s 、

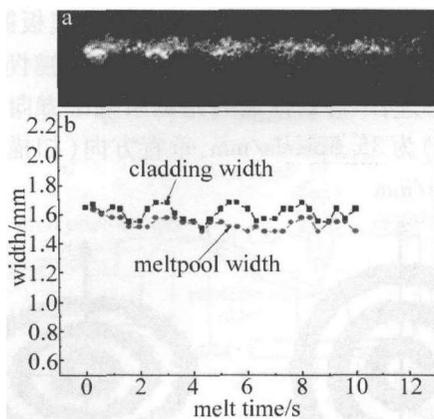


Fig. 7 a—actual clad b—cladding width and melt pool width

试验过程中大幅度改变送粉量的大小,得到检测的熔池宽度与熔覆带实际宽度的对比图,图7a为试验结束后熔覆带实物图,图7b为宽度对比图。

从图7中可以观察到,随着送粉量出现较大的波动,在线检测的熔池宽度也发生相应的改变;检测熔池宽度值比熔覆带实际宽度值要小,检测熔宽的变化比实际宽度的变化在时间上存在一定的滞后,在粉末量变化的拐点附近熔池宽度变化比熔覆带宽度变化稍平缓,但是熔池宽度与熔覆带宽度的变化趋势基本吻合。所以,可以利用熔池宽度的变化趋势来判断熔覆带宽度的变化趋势。

从试验结果可以看出,在线检测的熔池宽度与熔覆带实际宽度存在一定的误差,产生的原因主要有系统响应速度、图像处理软件、测量过程等几方面。系统响应速度主要由 CCD 响应时间、计算机处理和图像处理软件的速度等因素决定的,整个过程存在由于这些因素引起检测结果在时间上的滞后,在保证图像不失真的前提下,应尽量使用处理速度快的 CCD 和计算机,并改善图像处理的算法,提高系统的硬件和软件响应时间;图像处理软件中去噪声、阈值分割等的效果都会影响在线检测误差,导致最终提取的熔池宽度并不完全等于实际熔池宽度,优化图像处理算法获得更接近于实际熔池形貌的图像处理效果,提高熔池几何尺寸检测的准确度。采用 40 倍读数显微镜测量的实际宽度为熔覆带根部宽度,熔覆带与基体边界不分明,熔覆带宽度存在一定的测量误差,同时,熔池宽度的标定也影响了最终的测量精度,可能的情况下应尽量使用更精准的测量工具。

4 结论

(1)通过 CCD 摄像机在线拍摄加工区域,配合使

用专用熔池图像处理软件,能够实现激光熔覆熔池宽度动态变化的实时检测,以较快的速度准确提取熔池的特征参量。

(2)开发的 CCD 在线检测系统检测的数据基本反映了熔池的实际宽度及其变化规律,送粉量对熔池形貌有一定影响,随着送粉量发生改变,在线检测到的熔池宽度也发生相应的变化,且与熔覆带实际宽度的变化基本吻合。

(3)检测数据误差产生的主要原因是系统响应时间较长造成时间上的滞后和熔覆带宽度测量不精确以及图像处理软件算法不能完整反映熔池图像等,整个 CCD 在线检测系统还有待进一步优化。

参考文献

- [1] TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A, CORBIN S. Laser cladding [M]. Boca Raton, USA: CRC Press LLC, 2005:113-145.
- [2] YU G, YU H J. Intergrated laser intelligent manufacturing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002:426-463 (in Chinese).
- [3] DUBORG L, ARCHABEAULT J. Technological and scientific landscape of laser cladding process in 2007[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(24): 5863-5869.
- [4] FATHI A, KHAJEPOUR A, TOYSERKANI E, et al. Clad height control in laser solid freeform fabrication using a feedforward PID controller[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 35(3/4): 280-292.
- [5] ZHANG W M, WANG G R, SHI Y H, et al. On-line detection of underwater molten pool width based on structured light[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 33-36 (in Chinese).
- [6] YU D, ZHONG M L, LIU W J, et al. Realtime monitoring research of melt pool images in laser cladding process[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 34(4): 33-36 (in Chinese).
- [7] ZHOU F Q, CAI F H. Camera calibration method based on non-metric distortion correction [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 228-232 (in Chinese).
- [8] TAN H, CHEN J, LIN X, et al. Research on molten pool temperature in the process of laser rapid forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 198(1/3): 454-462.
- [9] IRAVANI-TABRIZIPOUR M, TOYSERKANI E. An image-based feature tracking measurement of clad height[J]. Machine Vision and Applications, 2007, 18(6): 343-354.
- [10] ASSELIN M, TOYSERKANI E, IRAVANI-TABRIZIPOUR M, et al. Development of trinocular CCD-based optical detector for real-time monitoring of laser cladding[C]//International Conference on Mechatronics & Automation Niagara Falls, 2005. Niagara Falls, Canada: Proceedings of the IEEE, 2005: 1190-1196.
- [11] LEI J B, YANG X Ch, CHEN J, et al. Study on measurement of cooling process in molten pool of CO₂ laser melt hardening[J]. Laser Technology, 2008, 32(2): 191-193 (in Chinese).