

激光加工中双工位加工系统的研究

张 健 吴锐欢 李泽曦 陈 国 张庆茂 刘颂豪

(华南师范大学广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要 为满足多工位或多工种的激光加工需求,以 Nd:YAG 脉冲激光器为光源,提出了双工位加工的实施方,设计出能实时改变激光光路的双工位分光装置,以及能对系统进行控制的系统控制电路,并确定了系统的工作流程及工作时序。最终实现与单工位时等功率输出的双工位系统。为检验实际加工效果,对 AZ91D 镁合金和 3003 铝合金分别进行了熔覆和焊接试验,并利用扫描电子显微镜(SEM)和电化学测量系统分别检测熔覆试样的熔覆层与基体结合界面的特征及耐腐蚀性,同时对焊接试样的显微硬度及拉伸性能进行检测。结果表明,熔覆后,熔覆层与基体结合良好,熔覆层组织致密、无裂纹和孔洞,自腐蚀电位比基体提高 1.18V,腐蚀电流降低约 5 个数量级;焊接后,铝合金的硬度变化范围为 HV_{0.05}27~54,抗拉强度约为母材的 82.3%,与单工位加工系统相比,加工效率提高了 24.6%,取得了较好的加工效果。

关键词 激光技术;双工位加工;激光加工;熔覆;焊接

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1003003

Research on Double-Station Processing System in Laser Processing

Zhang Jian Wu Ruihuan Li Zexi Chen Guo Zhang Qingmao Liu Songhao

(Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices of Guangdong, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract In order to meet the need of multi-station or multi-craft laser processing, with the Nd:YAG pulse laser as the optical source, a double-station processing system is developed. A double-station processing implementing scheme is proposed, and then a light-splitting device that can change the laser path in real time is designed. As well as a control circuit of the whole system, and the workflow, work time sequence of the system is worked out. Finally, a double-station system is realized, and it can provide the same output power as which of the single-station one. To test the processing result of the system, the cladding and welding experiments are respectively carried out on AZ91D magnesium alloy and 3003 aluminum alloy. With the help of scanning electron microscope(SEM) and the measuring system of electrochemistry, the features and corrosion resistance of the interface between the coating of cladding sample and the substrate are tested respectively. Besides, the microhardness and tensile property of the welding sample are tested. The results show that after cladding, the clad layer integrates well with the substrate and is compact in texture without cracks or holes. The self-corrosion potential is higher than the substrate by 1.18V and corrosion current is lower by 5 orders of magnitude. It also shows that the processing results are quite good after welding, with the hardness of aluminum alloy varying from HV_{0.05}27 to 54 and the tensile strength reaching 82.3% of that of the parent metal. And the process efficiency is improved by 24.6% compared with the single station processing system.

Key words laser; double-station processing; laser processing; cladding; welding

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 150.5758

收稿日期: 2013-04-10; **收到修改稿日期**: 2013-05-21

基金项目: 国家 863 计划(2012AA040210)、中央财政支持地方高校专项资金项目激光先进制造创新培养基地(510-C10293)、广东省教育部产学研结合重点项目(2010A090200048)和广东省教育厅学科建设专项(CXZD1139)

作者简介: 张 健(1982—),男,博士研究生,主要从事激光及应用技术等方面的研究。

E-mail: zhangjian200623@sina.com

导师简介: 张庆茂(1966—),男,博士,教授,主要从事激光先进制造技术方面的研究。

E-mail: zhangqm@scnu.edu.cn

1 引 言

激光加工实现了光、机、电技术的结合,是集高效、优质和低耗于一身的先进制造工艺技术^[1-2],也是航空、航天、汽车、模具、高速机车工业等领域中不可或缺的加工手段,代表着材料加工技术的重要发展方向^[3-7]。目前,激光加工设备已经成为提高激光加工技术质量与效率的关键性设备^[8-9]。而随着激光设备向小型化、高集成化的发展^[10-11],对激光制造技术提出了更高的要求:能耗更低、效率更高、性能更好、智能化更强等^[12-15]。

激光加工设备在工业及科学研究的应用中为降低能耗、节约成本而提出一机多用,已经成为新的发展趋势及热点^[16-18]。为达到在一台激光器上实现多工种及多工位的激光加工,同时又保证在不降低激光总功率,本文研究了一种双工位加工系统:在一台激光器的基础上,实现多光路多工位分时输出,并可完成不同类型激光加工。利用光纤进行传输,特别适合于柔性激光加工生产线或采用机器人自动加工的场合,是一种新型的激光加工系统。而且,该系统的两个工位,可全部用于焊接也可全部用于熔覆。最后通过对该系统进行激光熔覆及激光焊接试验,试验效果较为理想,均满足实际激光加工需求,为激光加工设备的优化提供了参考。

2 双工位加工系统结构

双工位加工系统由 Nd:YAG 脉冲激光器、双工位分光装置、系统控制电路、45°全反镜、光纤及工位组成。双工位分光装置是系统的核心,该装置由 30°旋转磁铁、可移动全反镜、全反镜固定架、挡光片及基座构成。Nd:YAG 激光器输出的光束,经 45°全反镜 A 反射后,当双工位分光装置的可移动全反镜处于落下状态,激光束直接入射至 45°全反镜 B,再次反射,耦合进入光纤 1,工位 1 输出激光;当双工位分光装置的可移动全反镜处于抬升状态,激光

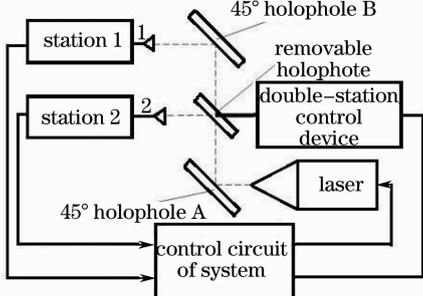


图 1 双工位加工系统

Fig. 1 System of double-station processing

束被该全反镜发射,耦合进入光纤 2,工位 2 输出激光。双工位加工系统如图 1 所示。

3 双工位加工的实现

3.1 分光装置的设计

为实现双工位加工,必须实现激光的双工位输出,即实现激光的时分复用,因此需要一个能够实时改变激光光路的双工位分光装置,实现对原激光束的分光。设计实现的双工位分光装置由 30°旋转磁铁、机械臂、导轨、轴套、可移动全反镜、全反镜固定架、挡光片、基座组成。30°旋转磁铁、机械臂、导轨安装在基座上,全反镜固定架安装在导轨滑片上,机械臂通过轴套连接全反镜固定架,全反镜固定架上安装着一块挡光片。当从系统控制电路获取信号,双工位分光装置上的 30°旋转磁铁工作,带动机械臂旋转 30°,使可移动全反镜沿着导轨移动,同时挡光片能随着可移动全反镜移动,为系统控制电路获取信号提供条件。双工位分光装置如图 2 所示。

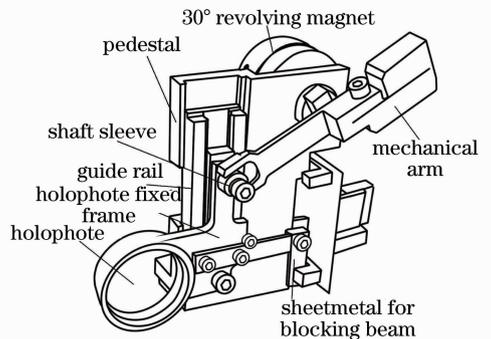


图 2 双工位分光装置

Fig. 2 Double-stations beam split device

3.2 系统控制电路的设计

在双工位加工系统中,为实现输出激光束的实时切换,必须对双工位分光装置实时控制,分光装置的实时控制由系统控制电路完成。另外,控制电路是实现激光器、分光装置、工作平台一体化的重要模块,能有效将光、机、电实现一体化控制。系统控制电路由核心控制单元、全反镜位置检测单元、磁铁驱动单元、激光输出控制单元组成,如图 3 所示。系统控制电路以核心控制单元为中心,连接其他工作单元。当核心控制单元接收到工业计算机控制信号或按键信号后,识别工位 1 或工位 2 的外部信号状态。同时,全反镜位置检测单元根据挡光片的位置,对全反镜位置进行检测,向核心控制单元发送位置信号。当全反镜处于目标位置时,核心控制单元不做处理;反之,核心控制单元先向激光输出控制单元发送信

号,控制激光器停止输出,再向磁铁驱动单元发送信号,控制 30°旋转磁铁旋转,从而改变全反镜位置。

最后,核心控制单元向激光输出控制单元发送信号,控制激光器输出激光,达到改变激光光路的目的。

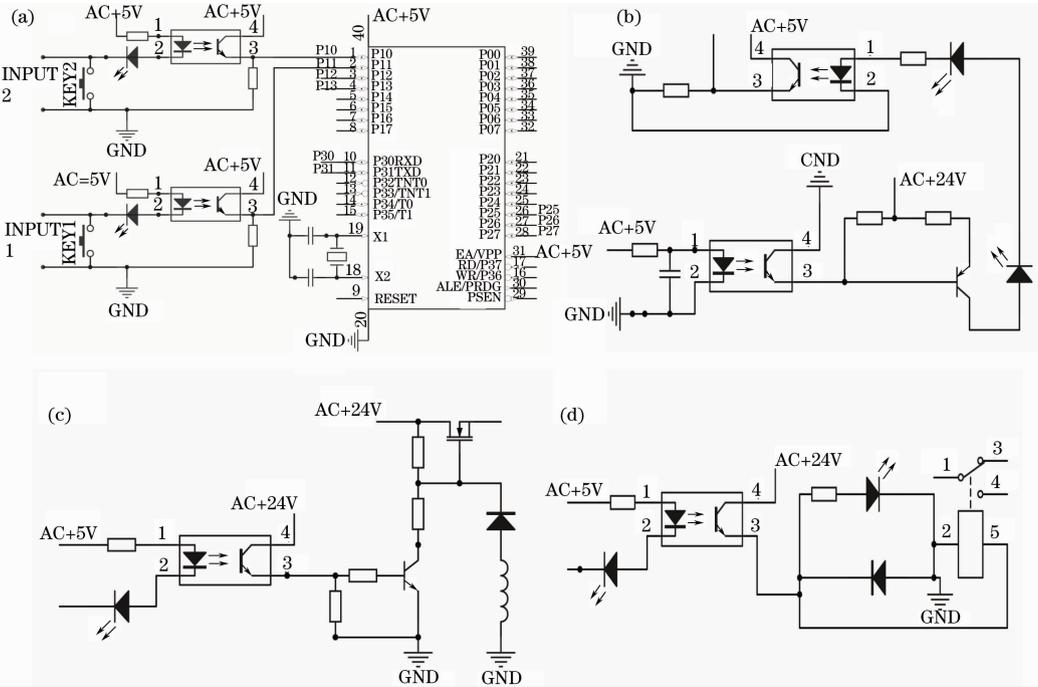


图 3 系统控制电路图。(a) 核心控制单元;(b) 全反镜位置检测单元;(c) 磁铁驱动单元;(d) 激光输出控制单元
Fig. 3 Control circuit diagram of system. (a) Core control unit; (b) holophote position detection unit; (c) magnet working unit; (d) laser output control unit

3.3 工作流程及工作时序

双工位加工系统通过激光的时分复用,与双工位分光装置相协调的动态响应来实现双工位的加工,而实现的前提是逻辑清晰的工作流程及控制时序。系统控制电路接收到工业计算机的控制信号或工位按键,开始检测全反镜位置。当全反镜已经处于目标位置时,系统控制电路不做处理;反之,系统

控制电路先控制激光器停止输出,再控制 30°旋转磁铁旋转,使双工位分光装置上的可移动全反镜到达目标位置,最后再控制激光器输出,实现双工位加工。系统的程序流程图如图 4(a)所示。系统的工作时序图如图 4(b)所示,可移动全反镜 200 ms 到达目标位置,系统控制电路延时 80 ms,当在目标位置稳定后,激光器输出激光。

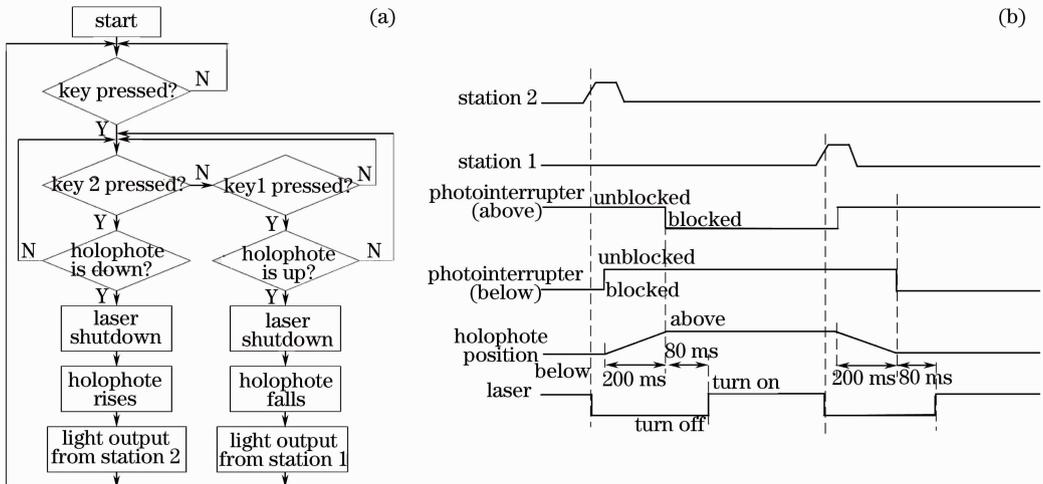


图 4 (a) 系统程序流程图;(b) 时序图
Fig. 4 (a) Workflow graph of procedure; (b) sequence chart

4 双工位加工系统的应用

Nd:YAG 脉冲激光器在实际工业应用中,一般主要用于激光焊接和激光熔覆。研究中,两个工位可以一个焊接一个熔覆,也可以全部用于焊接或者

全部用于熔覆。为检验该系统的实际加工效果,对于设计实现的双工位中,工位 1 用于熔覆,工位 2 用于焊接。系统实物如图 5 所示。

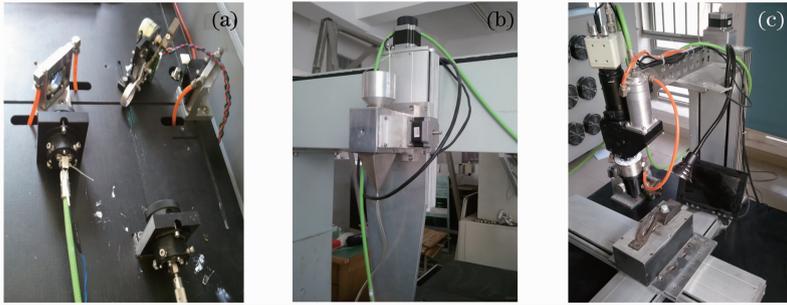


图 5 系统实物图。(a) 双工位加工系统; (b) 熔覆工位; (c) 焊接工位

Fig. 5 Physical diagram of system. (a) System of double-stations processing; (b) station of cladding; (c) station of welding

4.1 镁合金表面激光熔覆试验

通过工位 1 对 AZ91D 镁合金进行熔覆试验,研究其微观组织、形貌和耐蚀性。试验以双工位加工系统的工位 1 为试验平台,在激光器电流为 215A、频率为 6 Hz、扫描速度为 120 mm/min、离焦度为 22.5 mm 的条件下,在 30 mm × 30 mm × 5 mm AZ91D 镁合金表面上预置一层粒度为 150~320 目、厚度为 0.5mm 的 Co 基合金粉末,并对其进行熔覆。同时为了增大熔覆面积,进行多道熔覆,搭接率为 33%,单道熔覆后,待基体冷却后再进行第二道熔覆。熔覆完成后,做成试样,利用 JSM-6700F 型冷场发射电子显微镜观察微观组织和形貌。利用电化学测量系统测量基体和熔覆层的极化曲线。腐蚀介质为质量分数 3.5% 的 NaCl 水溶液、参比电极为饱和甘汞电极、辅助电极为铂电极、扫描速度为 5 mV/s、电压范围在 -2~2 V。测量基体和熔覆层的极化曲线。

激光熔覆 Co 基合金层的 SEM 像如图 6 所示,熔覆层无明显的气孔和裂纹,组织变化明显。在熔覆层与基体的交界处有一条细窄的“白亮带”,它是

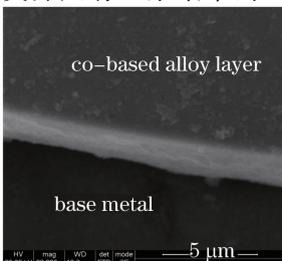


图 6 激光熔覆 Co 基合金层的 SEM 像

Fig. 6 SEM image of laser cladding Co-based alloy layer

通过基体材料的微量溶解和涂层材料向基体扩散而形成的冶金结合,具有较高的硬度和耐腐蚀性。

熔覆层与基体的极化曲线如图 7 所示。由图可知,基体的腐蚀开路电位为 -1.59 V,熔覆层的腐蚀开路电位为 -0.41 V,熔覆层的腐蚀电位明显正移,约为 1.18 V。在同一电位下,Co 基合金熔覆层的腐蚀电流密度大大减小,降低了约 5 个数量级,耐腐蚀性能提高。在 NaCl 水溶液中基体和熔覆层的极化线均属于活化—钝化转变过程曲线,随着外加电流增大,电位升高达到腐蚀电位时,腐蚀电流突然减小,表示进入钝化状态,随着电位的持续升高,腐蚀电流几乎不变,基体较熔覆层有更宽的钝化区。试验表明,该系统熔覆工位熔覆的 Co 基合金可显著提高基体的电化学腐蚀性能,且自腐蚀电位较高,耐腐蚀性更好。说明 Nd:YAG 脉冲激光器的原激光光束经本双工位加工系统分光后,用于熔覆工位的激光实际加工效果较好,满足工业熔覆要求。

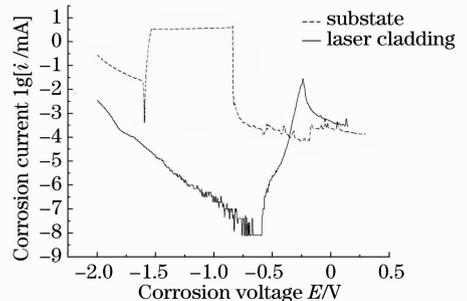


图 7 熔覆层与基体的极化曲线图

Fig. 7 Polarization curves of melting layer and substrate

4.2 铝合金的激光焊接试验

以双工位加工系统的工位 2 为实验平台,对

3003 铝合金进行焊接试验,研究其显微硬度及拉伸性能。试验在激光器扫描速度为 6 mm/s、激光重复频率为 30 Hz、离焦量为 0,保护气 Ar 流速为 0.2 L/ms 的条件下,利用不同单脉冲能量,分别对 3003 铝合金焊接试样板进行焊接。然后利用显微硬度计测量焊接试样的维氏显微硬度。依据焊缝区的打点稍密集,母材稍稀疏的原则,选取焊接试样,在焊缝水平方向自焊缝中心位置起向两侧每隔 0.1 mm 为一个测试点,从热影响区过渡到母材区后每隔 0.5 mm 为一个测试点,共进行了 13 组测量,获取焊接试样的维氏显微硬度。利用 RGM-430 型万能材料试验机对 3003 母材和焊接试样均做拉伸试验,获取 3003 母材及焊接试样的拉伸数据。另外,为研究本系统的激光焊接加工质量及加工效率,利用能量为 10 J 的单脉冲,在原单工位系统及本双工位系统分别对 3003 铝合金焊接试样板进行焊接,并对这两种加工条件下的焊缝宏观形貌及耗时进行观察、测量,耗时包括单工位加工系统的工件装夹时间 t_1 ,工件加工时间 t_2 ,加工调整(拆卸)时间 t_3 ,并测量了双工位加工系统的工件装夹时间 t_4 ,工件加工时间 t_5 ,加工调整(工位转换)时间 t_6 ,经多次测量后,分别对其取平均值。

焊缝宏观形貌如图 8 所示,无论原单工位系统还是本双工位系统,焊接所得到的焊缝均成形性好,宽度均匀,表面光滑、平整,鱼鳞状波纹均匀连续,无明显的气孔、裂纹及未熔合等表面缺陷存在。说明本双工位加工系统加工质量符合加工要求。

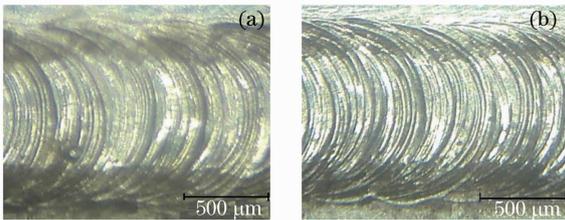


图 8 焊缝宏观形貌。(a) 单工位焊缝;(b) 双工位焊缝

Fig. 8 Macrography pattern of weld seam. (a) Single station for weld seam; (b) double station for weld seam

对试验所测数据取平均后得出, $t_1 = 4.2\text{ s}$, $t_2 = 19.5\text{ s}$, $t_3 = 2\text{ s}$, $t_4 = 4.3\text{ s}$, $t_5 = 19.6\text{ s}$, $t_6 = 0.2\text{ s}$ 。因此单工位系统加工耗时为 $T_s = 2t_1 + t_2 + t_3 = 29.9\text{ s}$,双工位加工系统加工耗时为 $T_d = t_4 + t_5 + t_6 = 24.1\text{ s}$,可见本双工位加工系统的耗时仅为单工位系统加工耗时的 80.6%,即加工效率提高了 24.6%。经过分析,对于同样加工两个工件,时间差异在于本双工位加工系统的加工调整时间,主要是系统中双工位分

光装置改变全反镜位置的耗时 200 ms,与原单工位系统相比,免去了多余的一次装夹时间 4.2s,和一次拆卸时间 2s,从而大大缩短了加工时间。因而在相同条件下,提高了加工效率。

母材拉伸数据如表 1 所示焊接试样抗拉强度随单脉冲能量变化曲线如图 9 所示。由试验结果可知:单脉冲激光在焊缝表面的作用能量加大,试样的抗拉强度也随之增大,这是由于增加了焊缝表面熔化面积和焊缝熔深;但是进一步加大单脉冲能量后,会造成能量过度集中,出现材料气化损失或焊漏现象,从而影响焊接质量,试样焊接接头的抗拉强度降低。由图 9 可知,当单脉冲能量为 10.5 J 时,试样的抗拉强度达到峰值。

表 1 3003 母材拉伸数据

Table 1 Tension data of 3003 base material

3003 alufer base material	Tensile strength /Mpa	Average tensile strength /Mpa
A	157.30	
B	155.07	155.98
C	155.58	

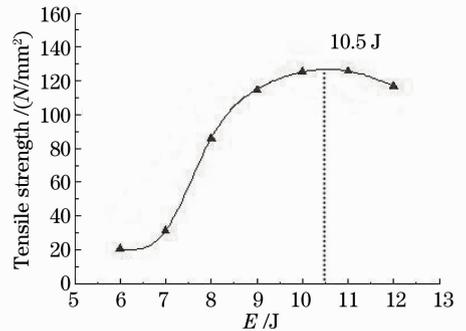


图 9 抗拉强度随单脉冲能量变化曲线

Fig. 9 Changing curve of tensile strength versus single pulse energies

在单脉冲能量为 10.5 J 时,焊接试样的显微硬度如图 10 所示。由检测结果可看出,焊接试样的焊缝区和热影响区的显微硬度基本上呈左右对称。显微硬度自基体材料经热影响区到焊缝区域呈减弱趋势,硬度变化范围较大。焊接试样的硬度变化范围为 $HV_{4.9} 27 \sim 54$ 。

试验结果表明,在单脉冲能量为 10.5 J 的条件下,抗拉强度最佳,为 128.5 MPa,约为母材抗拉强度的 82.3%,加工效率提高了 24.6%。说明 Nd:YAG 脉冲激光器的原激光光束经本双工位加工系统分光后,用于焊接工位的激光加工效果较好,适用于工业激光焊接加工,可投入实际加工生产。

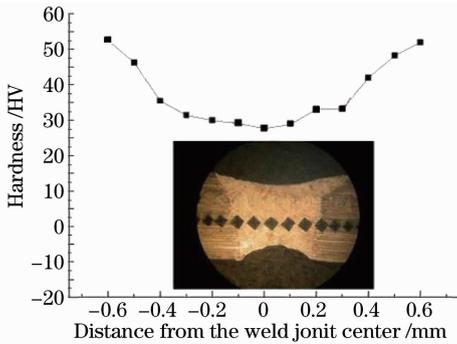


图 10 焊接试样的显微硬度

Fig. 10 Microhardness of welding sample

5 结 论

双工位加工系统,通过分光装置、系统控制电路、工作时序的设计,在一台激光器的基础上,设计了双光路输出,实现了系统的多工位加工。其特点如下:

1) 系统中的两个工位,可全部用于焊接,也可全部用于熔覆。其中文中提到的分光装置及系统控制电路为激光加工工业设备的优化提供了参考。

2) 经双工位加工系统的熔覆工位熔覆的镁合金试样,熔覆层与基体结合良好,且组织致密、无裂纹和孔洞。另外,熔覆层的腐蚀电位明显正移,约为 1.18 V。在同一电位下,Co 基合金熔覆层的腐蚀电流密度大大减小,降低了约 5 个数量级,耐腐蚀性能提高。

3) 经双工位加工系统的焊接工位焊接的铝合金试样,在单脉冲能量为 10.5 J 时,焊接试样的硬度变化范围为 HV_{4.9}27~54,铝合金抗拉强度约为母材的 82.3%,加工效率提高了 24.6%。

参 考 文 献

- 1 Zuo Tiechuan, Chen Hong. Green manufacture in 21 century——laser manufacturing technology and application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 106–110.
左铁钊, 陈虹. 21 世纪的绿色制造——激光制造技术及应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 106–110.
- 2 Wang Rende, Zhao Chunyu, Zhang Yaoman. Technology of CNC Machine[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2002.
王仁德, 赵春雨, 张耀满. 机床数控技术[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.
- 3 Chen Zhenqiang, Zhang Ge, Shen Hongyuan, et al.. High power red laser from intracavity/doubled Nd: YAlO₃/LBO laser[J]. Chinese J Lasers 2003, 30(10): 873–876.
陈振强, 张戈, 沈鸿元, 等. Nd: YAP/LBO 腔内倍频高功率红光激光器[J]. 中国激光, 2003, 30(10): 873–876.
- 4 Zhang Jian, Guo Liang, Zhang Qingmao, et al.. Resonant amplification structure of high-power Nd: YAG laser design and analysis[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0402002.
张健, 郭亮, 张庆茂, 等. 谐振放大结构的大功率 Nd: YAG 激光器设计及分析[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0402002.

- 5 L A Dipl-ing, S Michael, B Ludwing, et al.. High-quality and economically viable coating by means of tandem gas-shielded metal arc welding[J]. Welding and Cutting, 2002, 5: 246–253.
- 6 Chen Genyu, Chen Fei, Zhang Yi, et al.. Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603013.
陈根余, 陈飞, 张屹, 等. 对接间隙对车用高强度光纤激光焊接的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603013.
- 7 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2780–2798.
杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2780–2798.
- 8 Qiu Junlin, Cheng Zuhai. Industrial Laser Technology [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
丘军林, 程祖海. 工业激光技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- 9 Zhang Jian, Zhang Qingmao, Chen Guo, et al.. Nd: YAG pulsed laser double-pass time-sharing multiplexing system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 011402.
张健, 张庆茂, 陈国, 等. Nd: YAG 脉冲激光器双光路时分复用系统研究[J]. 激光与光电子进展, 2013, 50(1): 011402.
- 10 J A Arsecularatne, B Krustabto, P Mathew. An investigation of the high speed machining process using a variable flow stress machining theory[J]. Machining Science and Technology, 2004, 8(2): 211–233.
- 11 China Association for Science and Technology, Chinese Mechanical Engineering Society. Mechanical Engineering Development Report (2008-2009) (machinery) [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2009.
中国科学技术协会, 中国机械工程学会. 机械工程学科发展报告(2008-2009)(机械制造)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009.
- 12 Jiang Menghua, Li Qiang, Lei Hong, et al.. Study on producing non-tapered holes with adaptively collimating high peak power pulsed Nd: YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1003004.
姜梦华, 李强, 雷旬, 等. 高峰值功率自适应直脉冲 Nd: YAG 激光加工无锥度直孔研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1003004.
- 13 Chen Genyu, Mei Lifang, Zhang Mingjun, et al.. Application and research of laser processing automobile body manufacturing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(9): 17–23.
陈根余, 梅丽芳, 张明军, 等. 激光焊接、切割在汽车制造中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(9): 17–23.
- 14 R Li, P Hegde, A J Shih. High throughput drilling of titanium alloys[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 47(1): 63–74.
- 15 Luo Xi, Chen Peifeng, Wang Ying, et al.. An exploratory investigation of wide-band beam shaping for high power laser processing[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0403003.
罗曦, 陈培锋, 王英, 等. 新型高功率激光加工用激光光束展宽方法的探索性研究[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0403003.
- 16 Li Liqun, Tao Wang, Zhu Xianliang. Wire filling laser multilayer welding of high strength steel thick plate[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1251–1255.
李俐群, 陶汪, 朱先亮. 厚板高强度激光填丝多层焊工艺[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1251–1255.
- 17 Li Jingzhao, Zhu Haiyong, Chen Zhenqiang, et al.. All-solid-state continuous-wave laser at 447 nm[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 28–32.
李景照, 朱海水, 陈振强, 等. 全固态 447 nm 连续激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 28–32.
- 18 Su Shiping. Study on the Methods of Precision Modeling and Error Compensation for Multi-Axis CNC Machine Tools [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002.
粟时平. 多轴数控机床精度建模与误差补偿方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002.