

文章编号: 0258-7025(2007)11-1571-06

集成化激光制造系统的轴件焊接控制工艺

王恒海, 虞 钢, 庞 铭, 王立新, 宁伟健, 郑彩云

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 针对轴形零件实际焊接加工中遇到的困难, 利用现场总线、串口通信和 GALIL 运动控制卡实现了上位计算机对激光器、机器人以及旋转台等系统的同步控制, 提出了集成化激光制造系统的多种控制工艺焊接方法。对轴形零件进行了各种激光焊接控制工艺的实验研究, 证明了此控制系统可实现多种焊接控制工艺, 可以满足轴形零件激光焊接中变速度、变功率、偏角度等各种工艺条件焊接的需求, 为轴形零件实际激光焊接中遇到的焊接过程不稳定、首尾衔接处凹坑缺陷等难题的解决提供了新的方法。编程采用 VC++ 面向对象工具加以实现。

关键词 激光技术; 激光轴件焊接; 控制工艺; 同步; 缺陷

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

Cylinder Welding Control Technology of Integrated Laser Manufacturing System

WANG Heng-hai, YU Gang, PANG Ming,

WANG Li-xin, NING Wei-jian, ZHENG Cai-yun

(Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract To solve the difficulties in laser welding cylinder, laser system, robot system and rotary machine system are controlled synchronously by means of PROFIBUS-DP field-bus, GALIL movement controller card and COMM techniques. A novel method of multifunctional control laser welding for integrated laser manufacturing systems is presented. Experiments based on this method were carried out and the results proved that the multifunctional control laser welding could meet the demands of practical applications, such as speed changing, power changing and angle deflexion. And problems of laser welding cylinder, such as welding instability and pits appeared at the end of welding, were solved. Programming is realized by VC++ object-oriented tools.

Key words laser technique; laser cylinder welding; control technics; synchronization; defect

1 引 言

对于轴形零件环向焊缝的焊接目前仍然以 CO₂ 气体保护焊、手工电弧焊、埋弧焊^[1]、氩弧焊等传统的焊接工艺为主, 这些传统工艺存在可控性差、需填充材料、工艺繁琐等不足。摩擦焊为轴形零件的焊接提供了一种新的方法, 但摩擦焊的焊缝常会发生低应力破坏和表面缺陷^[2]。目前对轴件焊接研究多集中在电子束焊接和激光焊接, 但电子束焊接需要真空室和产生 X 射线。而激光焊接具有聚焦光斑

功率密度高、热输入量低、焊缝窄、热影响区小、焊接变形小、速度快等优点^[3], 很多材料对激光的吸收率大, 熔化率高^[4], 且不需要真空室和产生 X 射线^[5], 特别适合焊接特殊难焊的同种或异种金属^[6]。轴形零件激光对焊时也存在几个难题: 对焊的两根轴能否紧密挤压并在焊接过程中不产生相对移动; 焊接过程中能否稳定运行; 如何解决轴件各段焊前温度不同所造成的焊接不均匀; 如何解决焊接收尾时的焊接缺陷等。目前对于轴形零件的激光焊接通常是在恒定功率和恒定速度下进行的, 这样很难避免一

收稿日期: 2007-01-04; 收到修改稿日期: 2007-06-29

作者简介: 王恒海(1982—), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事激光与材料相互作用的实验和数值模拟研究。

E-mail: whhairay@163.com

导师简介: 虞 钢(1958—), 男, 上海人, 研究员, 博士生导师, 目前从事激光与材料相互作用和智能制造系统集成化领域及其应用方面的研究工作。E-mail: gyu@imech.ac.cn

些焊接缺陷,如焊接收尾时的凹坑。在长时间的连续焊接过程中,某些参量会发生改变,从而造成焊接质量的不稳定^[7]。对于首尾衔接处凹坑缺陷,在激光深熔焊接中极易出现,这些凹坑缺陷的产生与激光焊接时工艺参量配合是否合理有关^[8]。目前已有采用收尾时突然提高焊接速度并使焊缝首尾叠合1°的方法,可以较好地消除首尾衔接处的凹坑^[9]。

本文针对激光柔性加工系统和轴形零件焊接的特点在集成化激光制造系统^[10]下进行了多种焊接控制工艺的研究,提出了解决轴形零件特别是轴形异种金属实际焊接中焊接过程不稳定、首尾衔接处凹坑缺陷等难题的新方法。在集成化激光制造系统下进行智能焊接,为解决轴形零件激光焊接中存在

的难题提供了新的思路。

2 激光焊接控制系统

为实现多种控制工艺并解决轴形零件焊接中出现的难题,在集成化激光制造系统下设计了激光焊接控制系统,系统由硬件和软件两部分组成。硬件主要由计算机、激光器、机器人、旋转台、光纤传输和光束变换装置等组成。系统中激光器采用3kW连续固体激光器;机器人系统为5轴机器人系统;转台运动控制卡是美国GALIL运动控制卡,它主要用来实现旋转台下位机功能。整个控制系统硬件逻辑示意图如图1所示。

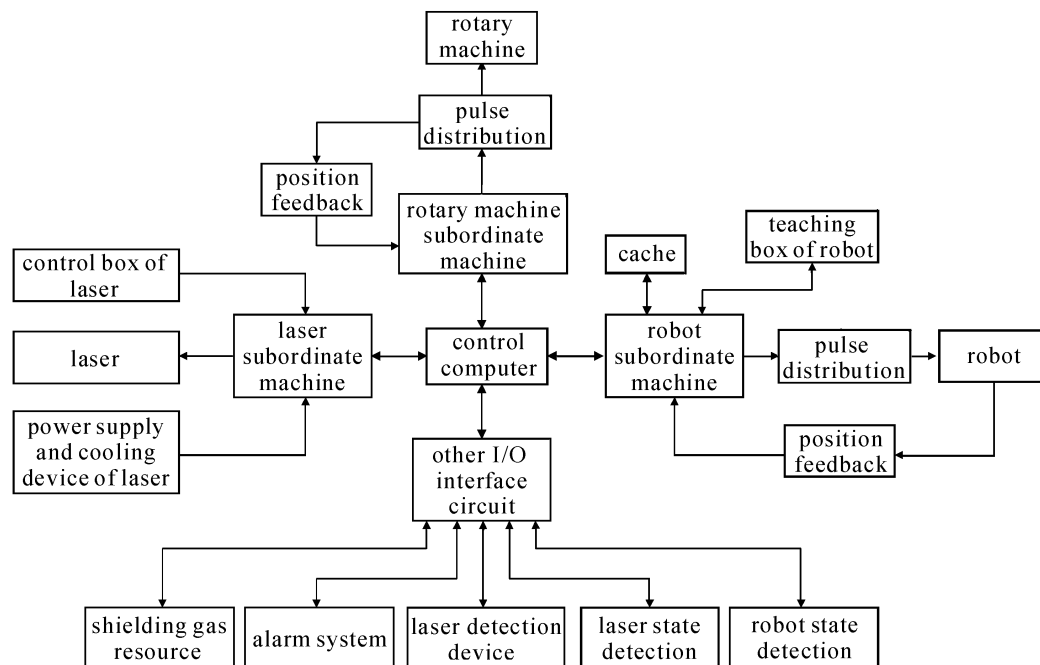


图1 控制系统硬件逻辑示意图

Fig. 1 Logic sketch map of control system's hardware

控制系统中激光器的控制通过过程现场总线(Process Field Bus, PROFIBUS)协议实现;机器人的控制通过串口通信机制实现;旋转台的控制通过GALIL运动控制卡实现;上位机主要用于完成数控编程、人机界面处理、网络功能等任务。系统采用一个上位机、多个下位机的控制逻辑,优点在于:上位机对各个下位机进行统一管理,分别向各个下位机发送执行命令;各个下位机独立运行,互不干扰,下位机的运行数据再反馈到上位机进行统一处理。这样既保证了系统整体的稳定性,同时各个下位机的独立运作又可以根据实际工作情况进行组合,为多种控制工艺的实现提供了理论保证。

控制软件编程采用VC++面向对象工具加以实现。将对激光器、机器人和旋转台等的控制集成于同一控制程序中,实现对激光器、机器人和旋转台的同步控制。激光器、机器人和旋转台三者的正常同步运行是实现多种焊接控制工艺的保证。

控制程序中各设备以类的形式形成控制系统,因而封装性好、集成化高,形成了界面友好、操作简单的激光焊接控制软件,平台选用Windows2000操作系统。图2为控制程序的调用逻辑图。

将上位机对机器人、激光器和旋转台下位机的控制归结为对类的操作,发送与接收的信息为类的属性,控制指令以功能归类为类的方法。

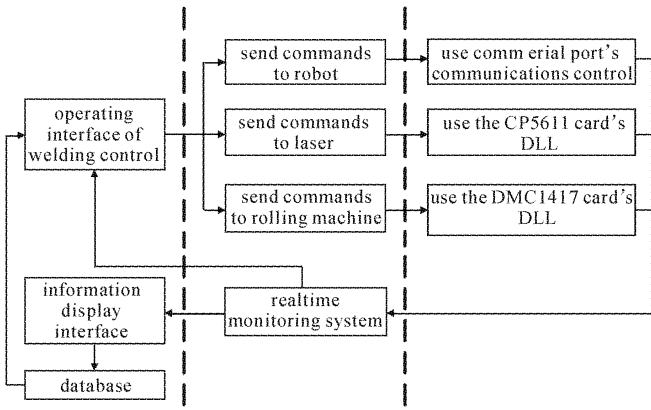


图 2 控制程序逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of control program

3 多种焊接控制工艺的实现方法

控制系统能根据轴形零件焊接中的实际需要实现各种工艺参量的焊接,焊接速度和激光功率可任意改变。用此系统进行了 45# 钢圆筒以及 K418 涡轮盘与 42CrMo 转轴的多种控制工艺的焊接实验,证明了此系统可实现焊接工艺控制的多样性。

对 K418 涡轮盘与 42CrMo 转轴进行焊接时,旋转台在转动过程中,涡轮盘与转轴可能会产生相对移动,因此在轴形零件焊接前一般要先在圆周内平均点焊几点,用以固定 K418 涡轮盘与 42CrMo 转轴。点焊过程为:旋转台先转一定角度,停止后激光器输出脉冲激光点焊第一点,同理再点焊剩余点。实验中采用的脉冲激光平均功率为 1000 W,脉宽为 100 ms。

3.1 连续匀速焊接

连续匀速焊接方案为使焊接过程中焊接速度和焊接功率都不变,整个焊接段匀速进行。

焊接过程为:开始焊接后,旋转台先转动,达到匀速后开始出激光,匀速转完焊接段后关激光,停旋转台。连续匀速焊接旋转台速度与激光器功率随旋

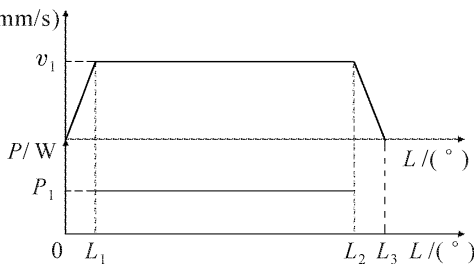


图 3 连续匀速焊接旋转台速度与激光器功率随旋转角度变化过程图

Fig. 3 Changing process of rolling machine's speed and laser power along with angle's change in continuous constant velocity welding

转角度变化过程图如图 3 所示。

图 3 中 0~L₁ 为加速阶段,L₁~L₂ 为焊接段,L₂~L₃ 为减速阶段。

3.2 变速焊接

在 K418 涡轮盘与 42CrMo 转轴的焊接过程中,后焊接的部分相对于前面焊接的部分焊前温度稍高,利用焊接速度的改变来消除后焊接的部分与前面焊接的部分的差异是可行的。因此系统中速度的任意改变是必需的。

变速焊接为将焊接段分为两段,两段焊接速度不同。

焊接过程为:开始焊接时,转台先转动,达到匀速后(如 5 mm/s)开始出激光,转完一段距离(90°)后,改变转台速度(如 6 mm/s)继续再转完剩余焊接段(270°)关激光,停转台。变速焊接旋转台速度与激光器功率随旋转角度变化过程图如图 4 所示。

图 4 中 L₁~L₃ 段为焊接段。

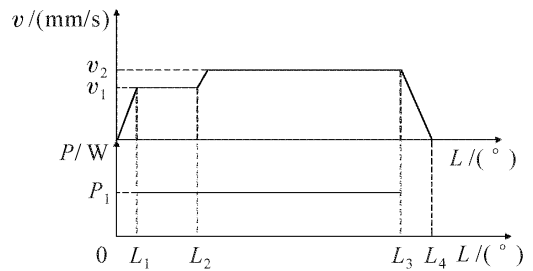


图 4 变速焊接旋转台速度与激光器功率随旋转角度变化过程图

Fig. 4 Changing process of rolling machine's speed and laser power along with angle's change in variable velocity welding

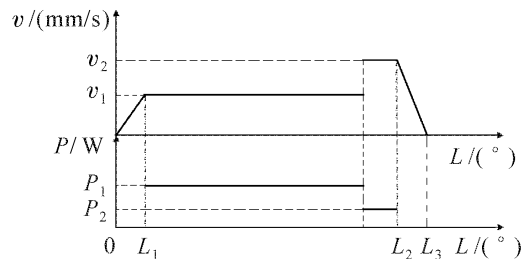


图 5 收尾变速变功率焊接旋转台速度与激光器功率随旋转角度变化过程图

Fig. 5 Changing process of rolling machine's speed and laser power along with angle's change in variable velocity and laser power welding in the end of welding

3.3 首尾衔接处凹坑缺陷的消除

通过对轴形零件的焊接实验,发现焊接的首尾衔接处比较容易出现凹坑缺陷,利用在焊接结束阶段突然提高焊接速度同时降低激光功率的方法可以

较好地减小凹坑缺陷。旋转台速度与激光器功率随旋转角度变化过程如图 5 所示。

3.4 变速变功率焊接

针对焊接首尾衔接处的凹坑缺陷,通过实验发现在焊接结束阶段将激光功率均匀线形下降也能减少缺陷。

系统中通过 GALIL 运动控制卡可以在任意时刻任意变化速度,激光器由 PROFIBUS-DP 控制,通过对功率和时间的调制(各时刻点的功率连成折线)可形成任意波形,因此可以控制任意时刻的激光功率大小。图 6 示意了可以编程实现功率随时间任意分布的波形形状,可以是三角波、方波、梯形波,时间可以延续很长的“无穷”波等^[11],为功率的线性下降提供了可能。

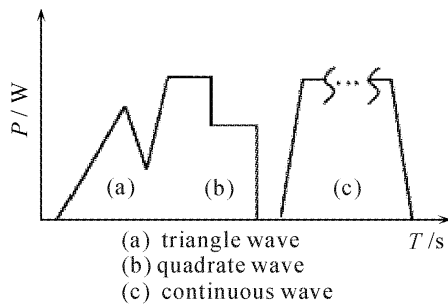


图 6 加工中的任意激光波形

Fig. 6 Random laser wave in manufacturing

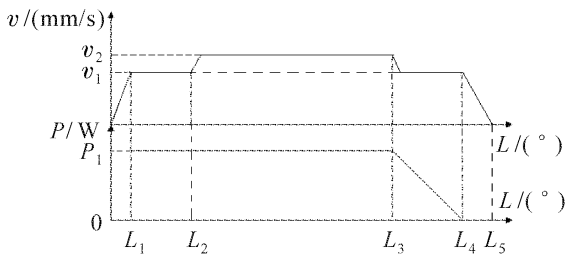


图 7 变速变功率焊接旋转台速度与激光器功率随旋转角度变化过程图

Fig. 7 Changing of rolling machine's speed and laser power along with angle's change in variable velocity and laser power welding

以在实验中应用到的一组焊接控制方案为例对变速变功率焊接加以说明。焊接过程为:开始焊接时,旋转台先转动,达到匀速后(5 mm/s)开始出激光,转完 90°后,改变转台速度(6 mm/s)继续再转完剩余焊接段(270°),然后再改变速度(5 mm/s)转 45°后关激光,停旋转台。最后 45°激光功率线形下降。变速变功率焊接旋转台速度与激光器功率随旋转角度变化过程图如图 7 所示。

图 7 中 $L_1 \sim L_3$ 段激光功率为 3 kW, $L_3 \sim L_4$

段激光功率线形下降。

3.5 其他焊接控制方案

由于系统中含有 5 自由度机器人,可进行空间角度和位移的变换,故可满足各种不同工艺条件和焊接场合,如激光束与水平面成一定角度的焊接等。在对 K418 涡轮盘与 42CrMo 转轴的焊接过程中,由于焊缝处下凹入涡轮盘,无法进行垂直焊接,故可以让激光头相对水平面偏转一定角度进行焊接,如图 8 所示。另外焊接角度等焊接工艺的调整也是 K418 与 42CrMo 异种金属焊接达到良好效果所需要考虑的因素。

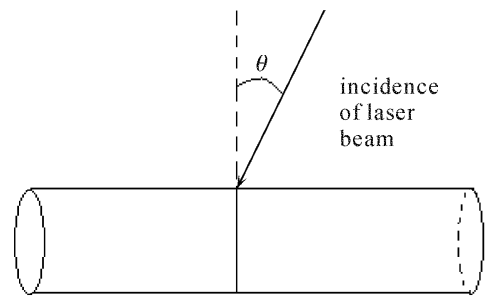


图 8 激光束偏转角度焊接示意图

Fig. 8 Sketch map of welding with laser beam of being not vertical

4 实验结果与讨论

激光深熔焊接工艺一般规律:在焊接速度等其他参量不变的情况下,仅提高激光功率,由于输入线能量增大等原因,焊缝一般会变深变宽,反之变浅变窄;在激光功率等其他工艺参量不变的情况下仅提高焊接速度,由于线能量减小等原因,焊缝一般会变浅变窄。正因为激光功率和焊接速度对最终焊接质量影响很大,因此可以通过改变这两个工艺参量来使焊接达到更好的效果。

利用此系统按上述各控制方案进行了 45# 钢圆筒的对焊以及铸态 K418 涡轮盘和调制质状态下 42CrMo 涡轮轴的焊接,实验过程稳定,运行位置准确。

利用焊接收尾阶段突然提高速度同时降低功率的方法对 45# 钢圆筒进行了焊接,实验结果证明了此方法可以较好地消除焊接首尾衔接处的凹坑缺陷。图 9 中分别为 45# 钢圆筒匀速恒功率焊接和收尾阶段提速降功率焊接的首尾衔接处焊接结果。从图中可以看出在匀速恒功率焊接首尾衔接处有明显的凹坑缺陷,而利用在收尾阶段突然提高速度,同时降低功率的方法进行激光焊接可以有效地消除焊接

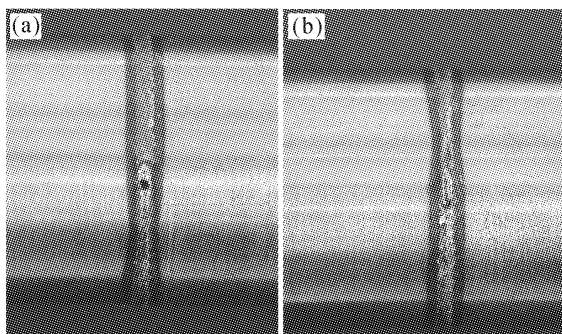


图 9 45# 钢圆筒匀速恒功率焊接(a)和收尾阶段提速降功率焊接(b)的首尾衔接处焊接结果

Fig.9 Ending of laser welding 45# steel cylinder using constant velocity and laser power (a), raised velocity and declined laser power at the end of welding (b)

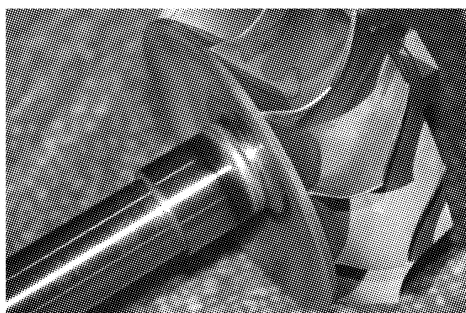


图 10 激光焊接发动机涡轮与转轴的焊后整体效果图
Fig. 10 Map of turbo and shaft after laser welding

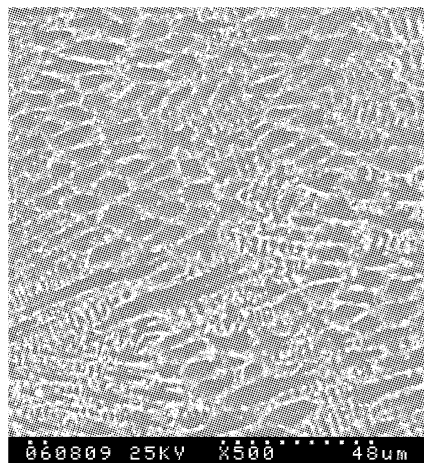


图 11 焊缝区域组织
Fig. 11 Microstructure of welding line

轴形零件首尾衔接处的凹坑缺陷。

利用焊接收尾阶段线性降低功率的方法对 K418 涡轮盘和调制质状态下的 42CrMo 涡轮轴进行焊接。所用工艺:激光束偏转 6.5° ,速度 8 mm/s ,离焦量 -3 mm ,激光功率 3 kW ,焊接开始后旋转台转过 360° 后激光功率线性下降,再转 45° 后停激光停旋转台。图 10 为焊后整体效果图。

由图 10 中可以看出,K418 涡轮盘与 42CrMo 转轴焊缝均匀平滑,无明显的表面缺陷,证明对轴形零件的焊接进行多工艺控制是必要的。

图 11 和图 12 分别为 K418 涡轮盘与 42CrMo 转轴焊后实验所得的焊缝区域组织和拉断断口形貌。由图 11 可以看出,焊缝区域组织颗粒细小均匀,形貌良好,无明显微观缺陷,主要是由于激光焊接快速加热快速冷却引起的;图 12 中断口形貌以韧窝为主,表明断裂为韧性断裂而非脆性断裂,有利于其拉伸强度的增大。

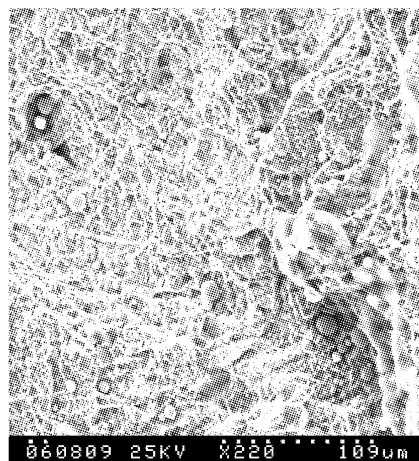


图 12 拉断断口形貌
Fig. 12 Microstructure of crack

5 结 论

在集成化激光制造系统中建立了轴形零件激光焊接控制系统,利用此系统进行了 45# 钢圆筒以及 K418 涡轮盘与 42CrMo 转轴的多种工艺的焊接实验,经过对实验结果的分析,证明了此控制系统可实现多种焊接控制工艺,可以满足轴形零件激光焊接中变速度、变功率、偏角度等各种工艺条件焊接的需求,解决了轴形零件实际焊接中遇到的凹坑缺陷等诸种焊接难题。在后续工作中还需针对不同的焊接条件设计焊接工艺,进一步优化焊接过程,寻找更合理的控制工艺和参量,尽可能地减少轴形零件焊接中的缺陷。

参 考 文 献

- 1 Guo Xuming, Qian Bainian, Zhang Yan *et al.*. External field treatment refining microstructures of pipe-line steel saw weld [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2001, **22**(2):27~30
国旭明,钱百年,张 艳 等. 外场处理细化管线钢埋弧焊缝的显微组织[J]. *焊接学报*, 2001, **22**(2):27~30
- 2 Du Suigeng, Fu Li, Cao Ying *et al.*. On strengthening the friction welding joint between K418 turbo disk and 42CrMo

- shaft [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2004, **22**(1):112~115
- 杜随更,傅莉,曹营等. K418 涡轮盘和 42CrMo 轴摩擦焊接头的强化[J]. 西北工业大学学报, 2004, **22**(1):112~115
- 3 Wang Hailin, Huang Weiling, Zhou Zhuoyou *et al.*. Laser welding of 8 mm thick stainless steel plates [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5):463~466
- 王海林,黄维玲,周卓尤等. 8 mm 厚不锈钢板的 Nd:YAG 激光焊接[J]. 中国激光, 2003, **30**(5):463~466
- 4 Chen Tao, Chen Jimin, Wang Zhiyong *et al.*. Welding property comparison study between two major high power industrial lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2):185~188
- 陈涛,陈继民,王智勇等. 两种大功率工业激光焊接特性的比较[J]. 中国激光, 2002, **A29**(2):185~188
- 5 Z. Sun, J. C. Ion. Review laser welding of dissimilar metal combinations [J]. *Journal of Materials Science*, 1995, **30**(17):4205~4214
- 6 Gandham Phanikumar, Sambandam Manjini, Pradip Dutia *et al.*. Characterization of a continuous CO₂ laser-welded Fe-Cu dissimilar couple [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, **36**(8):2137~2147
- 7 Zeng Hao, Zhou Zude, Cheng Youping *et al.*. Real-time in-process monitoring of laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3):284~288
- 曾浩,周祖德,陈幼平等. 激光焊接过程实时监测[J]. 中国激光, 2001, **A28**(3):284~288
- 8 Yan Xiaojun, Yang Dazhi, Liu Liming. Welding parameters and microstructure of pulse laser welded 316L stainless steel sheet [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, **25**(3):121~123
- 阎小军,杨大智,刘黎明. 316L 不锈钢薄板脉冲激光焊工艺参数及接头组织特征[J]. 焊接学报, 2004, **25**(3):121~123
- 9 Li Xiaoping, Tang Yangping, Feng Qingxiu. Research on the laser welding technology for automobile transmission gears and gear ring [J]. *Automobile Technology*, 2004, (4):22~24
- 李小平,汤漾平,冯清秀. 汽车变速器齿轮与齿圈激光焊接工艺研究[J]. 汽车技术, 2000, (4):22~24
- 10 Yu Gang, Yu Heji. Integrated Laser Intelligent Manufacturing [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2001. 109~112
- 虞钢,虞和济. 集成化激光智能加工工程[M]. 北京:冶金工业出版社, 2001. 109~112
- 11 Zhang Taohong, Yu Gang, Wang Lixin *et al.*. Numerical control of laser machine system based on PROFIBUS-DP [J]. *Industrial Control Computer*, 2005, **18**(2):75~76
- 张桃红,虞钢,王立新等. 基于 PROFIBUS-DP 的激光加工系统数字化控制[J]. 工业控制计算机, 2005, **18**(2):75~76

《激光技术及其应用》汇编介绍

为了更好地服务科研工作者、工程技术人员以及其他激光行业的从业人员,总结研究开发经验,中国科学院上海光学精密机械研究所光学期刊联合编辑部从近年来《中国激光》和《光学学报》上发表的论文中精选了激光实验技术与应用方向的优秀论文,结集出版。

论文集共收录论文 39 篇,主要反映了激光器技术、传感器技术、微细加工技术、光学测量与计量等方面的研究进展。

感兴趣的读者请与本刊发行部的高先生联系。

电 话:021-69918253 E-mail:gfhai@siom.ac.cn

《中国激光》编辑部