

# 激光熔覆熔池温度监测与控制系统的研究现状

胡晓冬<sup>1,2</sup> 于成松<sup>1,2</sup> 姚建华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014)

<sup>2</sup> 浙江工业大学激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014

**摘要** 激光熔覆是一种新兴的材料表面技术,近年来得到了快速发展。激光熔覆层的质量受熔覆过程中多种因素的影响,其中熔池温度是一个非常关键的因素,激光熔覆熔池温度的监测与控制系统的研究对提高熔覆层质量具有重大意义。介绍了激光熔覆熔池温度的检测方法,综述了目前激光熔覆熔池温度控制系统的研究现状,并列举了部分温度控制系统。根据目前国内外的现状提出了熔池温度监测与控制系统的发展方向。

**关键词** 激光技术;激光熔覆;熔池;温度检测;闭环控制

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.120003

## Review of Laser Cladding Molten Pool Temperature Measurement and Control System

Hu Xiaodong<sup>1,2</sup> Yu Chengsong<sup>1,2</sup> Yao Jianhua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

<sup>2</sup> Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

**Abstract** Laser cladding is a new surface technology that has been developed rapidly in recent years. The performance of laser cladding layer is influenced by various factors, among which temperature of molten pool is a key factor in particular. The temperature measurement and control of laser cladding molten pool play an important role in controlling the quality of laser cladding. We introduce the commonly used temperature measurement methods, and review the current research state in various control systems for molten pool temperature of laser cladding. Based on the review, the future development of temperature measurement and control is prospected.

**Key words** laser technique; laser cladding; molten pool; temperature detection; closed-loop control

**OCIS codes** 140.3390; 040.1880; 120.6780; 280.6780

## 1 引言

激光熔覆是一种新兴的材料表面改性技术。由于激光熔覆涂层在抗蚀、耐磨方面表现出的特殊性能,使得激光熔覆技术从实验室走向了工业应用,并广泛应用于航空航天、汽车、模具、生物医药等行业<sup>[1-3]</sup>。但随着科技和工业的快速发展,对激光熔覆层质量的要求也越来越高。熔覆层的变形开裂是激光熔覆技术中最棘手的问题,它严重阻碍着激光熔覆技术的应用和发展。影响熔覆层质量的因素有很多,主要包括激光功率、扫描速度、光斑直径、熔池温度和送粉率等,在这些因素中,熔池温度对熔覆层的质量有着很大的影响。温度决定了熔池的尺寸和稀释度,如果温度过低,熔池就不能吸收足够的粉末;如果温度太高,就会造成过熔现象。通过对熔池温度的控制可以有效减少裂纹、过熔、欠熔现象的产生<sup>[4-5]</sup>。因此在激光熔覆的加工过程中对熔池温度监控系统的研究对于提高熔覆层的加工质量具有重大意义。

激光熔覆技术自1976年诞生以来,加工系统经历着不断的改进和变化。自1993年以来,激光熔覆技术

收稿日期: 2013-07-13; 收到修改稿日期: 2013-09-03; 网络出版日期: 2013-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(51271170)、国家国际科技合作项目(2011DFR71030)、浙江省科技厅公益项目(2013C31012)

作者简介: 胡晓冬(1975—),男,博士,副教授,主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: hooxoodoo@zjut.edu.cn

从早期的工艺参数研究转变为现代激光熔覆技术。现代激光熔覆主要集中在加工过程参数的测量和控制,而温度的监测和控制系统的研究还不完善,熔覆层加工质量的稳定性和统一性还存在问题,加工参数大都以实验归纳来确定,从定性认识到定量的控制研究以及激光熔覆高精度高质量加工系统信息的获取、处理、融合研究较少<sup>[6]</sup>。随着计算机技术的发展,熔池温度的测控系统的研究有了很大的进步。本文介绍了目前激光熔覆熔池温度的监测方法及温度控制系统的研究现状,以为熔池温度的测控系统研究提供参考。

## 2 激光熔覆过程温度的检测方法

在激光熔池温度的检测方面,根据传感器和被测对象是否接触分为接触测温和非接触测温。接触测温一般采用热电偶测温方法,非接触测温一般采用辐射测温的方法,主要包括单色测温法、比色测温法和 CCD 图像信号采集测温等。国外在激光熔池温度的检测方面研究较早,早在 1973 年 Swift-Hook 等<sup>[7]</sup>便对熔池温度场有了研究。国内起步相对较晚,随着科技的发展,国内在熔池温度检测方面也取得了巨大进展。

### 2.1 接触式温度检测

李延民等<sup>[8]</sup>采用多路热电偶对激光熔覆过程熔池的温度进行了检测,其热电偶设计原理如图 1 所示,在激光多层的熔覆过程中采用多路函数记录仪记录温度的变化。实验结果表明工件内部的温度呈周期性变化,且随着熔覆层数的增加温度梯度逐渐减小。其缺点是不能够对熔池温度及周边温度进行直接测量,测量结果还不能用于温度反馈控制系统。Griffith 等<sup>[9]</sup>采用热电偶对空心桶熔覆成形过程进行了温度监测,测量结果指出已熔覆部分的热处理对熔覆成形件的热应力有着很大的影响。Hu 等<sup>[10]</sup>等采用 W-Rh 和 Pt-Rh 热电偶对熔池表面不同位置进行定点测温,测量结果可以达到高温计的测量效果。

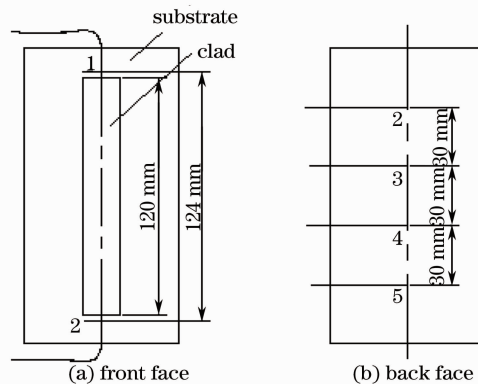


图 1 热电偶测温分布图

Fig. 1 Distribution of thermocouples for temperature measurement

### 2.2 非接触式温度检测

与热电偶熔池温度检测相比,非接触测温具有很大的优点,它可以对熔池内部及周边温度场进行直接测温,同时受环境和自身的影响较小,测温精度较高,动态响应快。谭华<sup>[11]</sup>指出比色红外测温仪以其较强的适

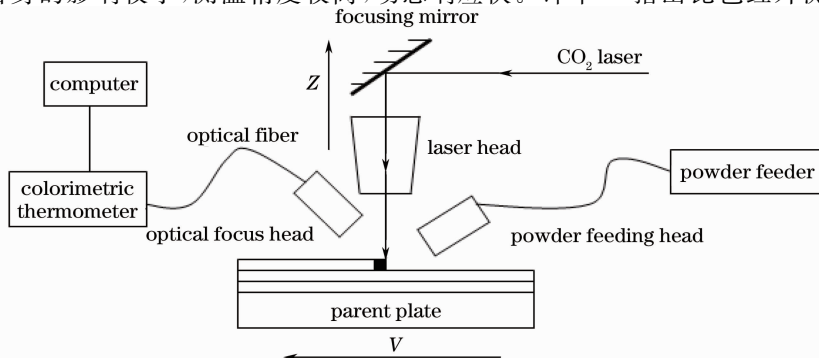


图 2 温度监测系统示意图

Fig. 2 Schematic of temperature monitoring system

应性和抗干扰能力,在激光快速成形的恶劣条件下,测量结果具有较高的准确性,其测温平台如图 2 所示,采用比色热像仪进行温度的测量,可以实现温度的实时显示,并实时显示温度的走势曲线。陈钟<sup>[12]</sup>采用红外热像仪对熔池温度进行了跟踪测量,其原理是把测温仪与激光器固定在一起,在激光熔覆的过程中可以对熔池温度实时监测,更可以直观地看到温度的变化情况,为激光熔覆熔池温度的在线实时控制奠定了基础。

宁国庆等<sup>[13]</sup>采用红外双色传感器对直接制造金属零件过程中的熔池温度进行了检测。周广才等<sup>[14]</sup>等采用改进的温度传感器对熔池温度进行了测量,并开发了熔池温度反馈控制系统,保证了熔池温度的稳定性。Hand 等<sup>[15]</sup>采用双色高温计对快速成型件熔池温度进行了检测,并指出熔池温度具有一定的累积效应,对熔覆层质量具有较大的影响。Lin 等<sup>[16]</sup>采用红外测温仪对熔覆层正下方 0.5 mm 处的熔池温度进行了测量,并利用反对法进行了熔池热量输入量的计算。Sun 等<sup>[17]</sup>利用比色测温仪对熔池温度进行了测量,指出为了确保熔池形貌的稳定性,熔池温度必须控制在一定的温度范围内。

随着计算机和 CCD 传感器的发展,国内外对 CCD 相机用于激光熔池温度检测的研究也越来越多<sup>[18-24]</sup>。姜淑娟等<sup>[18]</sup>采用比色图像采集的方法,把 CCD 相机固定在激光头上,其测温原理图如图 3 所示,在加工的过程中保证 CCD 与激光头的同步运动,减小了测量的误差,实验结果表明该装置可以实现预期的结果,保证了测温的精度,为 CCD 在熔池温度在线控制中的应用提供了理论基础。

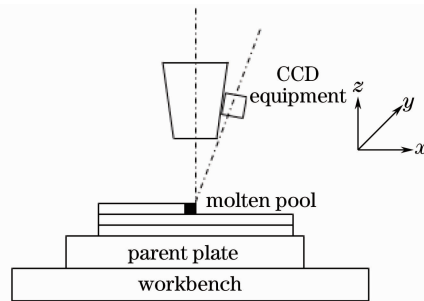


图 3 图像采集原理图

Fig. 3 Schematic of image acquisition

雷剑波等<sup>[19-20]</sup>对熔池温度场进行了研究,并基于 CCD 开发了一套熔池温度动态检测系统,其测温原理如图 4 所示。该方案的原理是 CCD 采集熔池双波长图像信息,图像采集卡将采集到的信息传送给计算机,计算机对图像进行噪声滤波,然后按程序要求提取图像灰度值,并按比色测温算法对图像进行处理,通过伪着色对温度场的图像分布进行显示,进一步发展可用于激光加工在线控制。该系统的缺点在于 CCD 采集的图像信号噪声较多,具有一定的信号失真,通过一定的处理手段可减少该现象的发生,同时该系统的测温不受材料、测温距离和工件表面状况的影响,具有一定的测温稳定性。

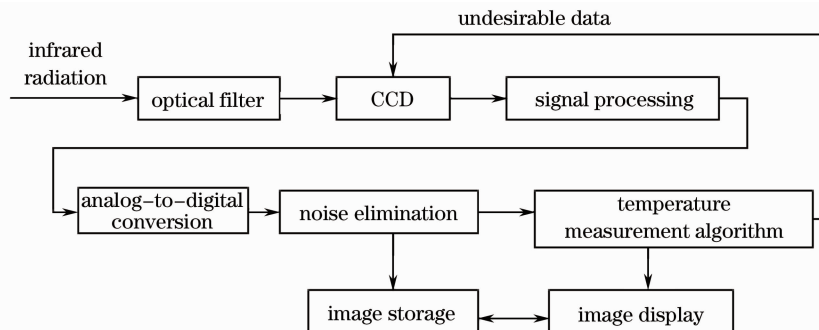


图 4 测温系统原理图

Fig. 4 Schematic of temperature measurement system

### 3 激光熔池温度测控系统

国外激光熔覆技术起步较早,始于 20 世纪 80 年代,经过近十年的快速发展,激光熔覆熔池温度控制系

统已经应用于工业生产。20世纪90年代初期,熔池温度的控制已经取得了较大的研究进展,Grnenwald等<sup>[25]</sup>采用高温计对激光熔池表面温度进行检测并闭环反馈控制,控制回路如图5所示,通过对熔覆过程中的激光功率进行适时调整,保证了熔池温度的稳定。该系统的控制原理是通过高温计对熔池温度进行检测,通过比例-积分-微分(PID)算法适时调整激光器功率控制器,进而保证熔池温度的稳定性。1993年,Li等<sup>[26]</sup>采用CCD对激光熔池动态过程进行了图像采集,并实时调节放电电流来控制激光器的输出功率,进而达到熔池温度的稳定控制。

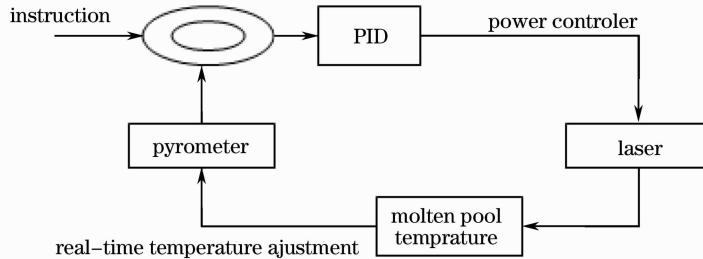


图5 激光熔覆熔池温度控制原理框图

Fig. 5 Schematic of molten pool temperature control in laser cladding

美国密西根大学 Mazumder 等<sup>[27]</sup>开发了数字微镜(DMD)技术,并加入了DMD反馈控制系统,该系统已进入了商品化生产阶段,其反馈控制主要包括两个方面的控制,一方面是对熔覆高度进行控制,另外一个关键控制因素是对熔池进行闭环控制,包括熔池的尺寸、温度等。温度闭环反馈控制从DMD控制系统中分离出后的原理框图如图6所示,其原理是通过棱镜对熔池温度检测过程中的噪声加以抑制,并通过双色红外测温仪对熔池温度进行检测,把采样信号传送到DMD控制中心,DMD控制系统通过调节激光实时功率,进而使温度保持稳定。英国诺丁汉大学Bi等<sup>[28]</sup>通过对不同测温系统的研究,开发了一套基于CCD红外温度信号检测技术的同轴温度信号控制系统,其实验装置如图7所示,实验结果表明该系统可以很好地控制熔池温度的稳定性。澳大利亚Salehi等<sup>[29]</sup>采用LabView系统检测并控制熔池温度,降低了熔覆层的稀释率。

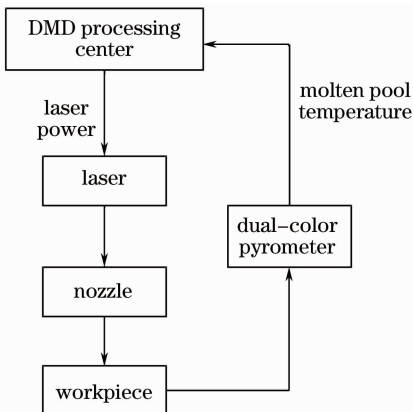


图6 DMD系统温度控制原理图

Fig. 6 Schematic of temperature control by DMD system

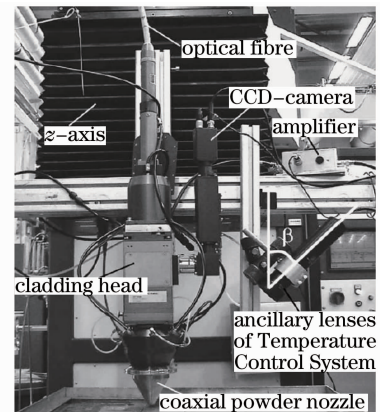


图7 熔池温度控制系统实验搭建图

Fig. 7 Experimental set-up of molten pool temperature control system

我国在激光熔覆加工技术上的研究始于20世纪90年代初期,比国外晚了近10年的时间。国内在激光熔池温度控制系统方面的研究还不成熟,还不能完全应用到实际工业生产上去,对熔池温度的控制大都以数值模拟为基础,进而指导实验加工过程。与国外熔池温度的控制系统相比,国内总体研究水平相对较低,控制策略和控制手段还不完善,但部分研究单位在激光熔池温度控制系统的研究上已经取得了巨大进步。

周广才等<sup>[14]</sup>开发了熔池温度闭环反馈控制系统,其原理如图8所示,经改进的温度传感器检测熔池温度,并与工艺要求最佳温度相比较,其差值经信号处理控制数控系统实时调节工艺参数,进而保证熔池温度的稳定性。该系统的优点在于采用改进的温度传感器对熔池温度进行采集,提高了温度采样的精度。姜淑

娟等<sup>[30]</sup>采用 CCD 相机完成熔池图像的采集,然后经计算机计算出熔池的温度,经 PID 模糊控制对熔池温度场进行控制,实验表明熔池温度的稳定性得到了很好的控制,可以实现激光加工的实时控制,有效提高了产品的质量。

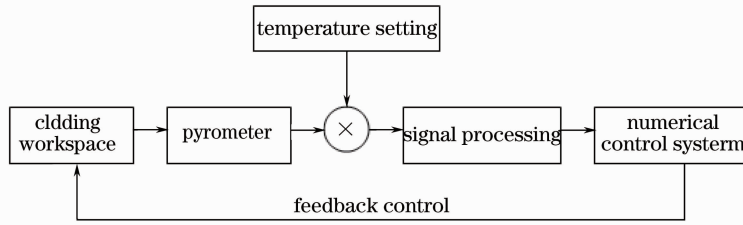


图 8 熔池温度闭环控制系统原理图

Fig. 8 Schematic of closed loop control system of molten pool temperature

沈治<sup>[4]</sup>采用高温热像仪对激光熔池温度进行监测,并基于模糊控制理论建立了熔池温度闭环控制系统,其模糊控制系统框图如图 9 所示,反馈控制原理是传感器采集的温度高于设定温度时通过模糊控制器提高扫描温度,采集温度低于设定温度时降低扫描速度。实验表明,通过熔池温度的控制可以有效提高熔覆层的质量,减少熔覆过程中工件的变形开裂。

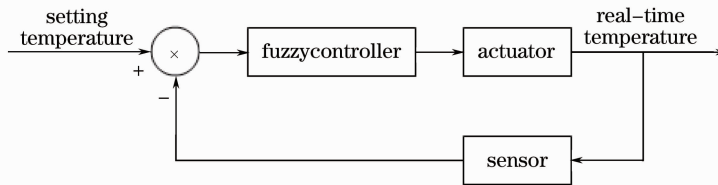


图 9 模糊控制系统

Fig. 9 Fuzzy control system

随着计算机技术的快速发展,激光熔覆熔池温度的测控技术已取得了很大的进步,国外已进入了实际工业应用阶段。由于我国激光技术起步较晚,控制策略、方法还不成熟,控制手段有待完善,大部分的熔池温度控制系统还处在实验室阶段,部分还不能实现熔池温度的自动化、智能化控制。

为了有效解决以上问题,我们以数字信号处理器(DSP)为核心,采用模块化结构对激光熔覆过程中熔池温度的监测与控制系统进行了设计,控制原理如图 10 所示。该系统结构简单、操作方便、抗干扰能力强,人机界面由液晶显示器(LCD)和矩阵键盘组成,可以通过键盘实现温度的设置,实现了温度量化控制,同时对送粉器进行了开环控制,丰富了熔池温度监控系统功能。在反馈控制过程中,通过模糊控制算法实时调节激光功率的输出,达到熔池温度稳定的目的。

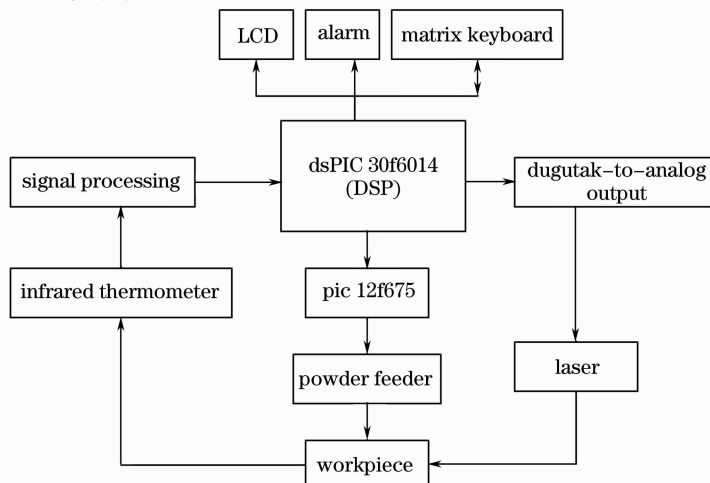


图 10 提出的熔池温度闭环控制系统原理图

Fig. 10 Schematic of the proposed closed loop control system for molten pool temperature

图 11 为激光熔覆熔池温度实时反馈控制曲线,其设定温度为 1250 °C,启动功率为 0.5 kW,在 45# 钢基板上以 2 mm/s 的扫描速度进行激光熔覆实验,控制精度为 5 °C。由实验数据可知,该系统响应速度快,控制精度高。

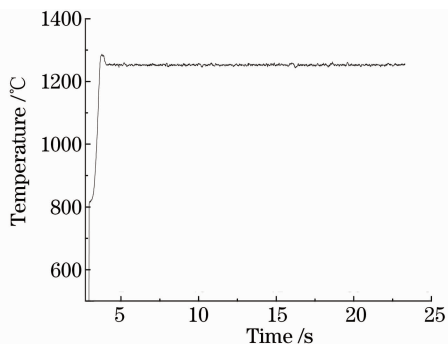


图 11 熔池温度实时控制曲线

Fig. 11 Molten pool temperature real-time control curve

## 4 结束语

通过对国内外研究现状的分析及本课题组相关领域的研究,获得高质量的熔覆层及高精度、高实时性的激光熔覆熔池温度监测与控制系统,应在以下三个方面作进一步的研究。

1) 熔池温度基础理论的研究。不断加强熔池温度场的分布研究,分析熔覆工艺参数对熔池温度的影响,建立熔覆控制过程优化模型,为自动化控制提供基础理论。

2) 改进熔覆设备。熔覆设备是熔池温度控制系统集成的载体,激光器的大功率和小型化的研制可以更好地适应规模化和自动化的生产,为控制系统的商业化生产提供了可能性;熔池温度控制系统的不断改进,也为熔覆层质量的稳定性和精确性提供了可能。温度控制系统应朝着自动化、智能化的方向发展。

3) 熔池温度的定量控制。无论国内还是国外,激光熔覆层质量的控制大都以实验归纳为主,然后改进工艺参数来提高熔覆层质量的稳定性,控制熔池温度的机制还不完善。国内对熔池温度信息的获取、分析和处理研究较少,熔池温度的控制应该从经验式的数值模拟走向定量控制。

## 参 考 文 献

- Liu Zhenfeng, Li Zhengjia. Application of laser cladding in aviation industry [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2007, 43(1): 37-40.  
刘珍峰, 李正佳. 激光熔覆技术在航空工业中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2007, 43(1): 37-40.
- Cai Jun, Liang Haifeng, Liu Guolin. The laser surface strengthening technology application of automobile large-scale cover mold [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2008, (7): 25-26.  
蔡 军, 梁海峰, 刘国林. 汽车大型覆盖件模具激光表面强化技术的应用[J]. 装备制造技术, 2008, (7): 25-26.
- Koch J L, Maumder J. Rapid prototyping by laser cladding [C]. SPIE, 1993, 2306: 556-562.
- Shen Zhi. Research on adaptive control to processing temperature in laser cladding process [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(22): 118-120.  
沈 治. 激光熔覆加工中加工温度自适应控制研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(22): 118-120.
- Wang Mingdi, Liu Xiubo, Guo Kaibo, et al.. Stress analysis and crack control of laser cladding forming [C]. The 14th National Special Processing Academic Conference Proceedings, 2011. 494-497.  
王明娣, 刘秀波, 郭开波, 等. 激光熔覆成形件的应力分析与裂纹控制 [C]. 第 14 届全国特种加工学术会议论文集, 2011. 494-497.
- Sun Huilai, Zhao Fangfang, Lin Shuzhong, et al.. Research progress and development trend on laser cladding [J]. Laser Journal, 2008, 29(1): 4-6.  
孙会来, 赵方方, 林树忠, 等. 激光熔覆研究现状与发展趋势 [J]. 激光杂志, 2008, 29(1): 4-6.
- Swift-Hook D T, Gick A E F. Penetration welding with lasers [J]. Welding Journal, 1973, 52(suppl.): 492-499.
- Li Yanmin, Liu Zhenxia, Yang Haiou, et al.. Measurement and simulation of temperature field during multi-layer laser cladding [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(5): 521-525.  
李延民, 刘振侠, 杨海欧, 等. 激光多层涂敷过程中的温度场测量与数值模拟 [J]. 金属学报, 2003, 39(5): 521-525.

- 9 M L Griffith, M E Schlienger, L D Harwell, *et al.*. Understanding thermal behavior in the LENS process[J]. *Materials and Design*, 1999, 20(1-2): 107-113.
- 10 Y P Hu, C W Chen, K Mukherjee. Measurement of temperature distributions during laser cladding Process[J]. *J Laser Applications*, 2000, 12(3): 126-130.
- 11 Tan Hua. Temperature Measurement and Research on Microstructure Controlling in Laser Rapid Forming[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. 38-57.  
谭 华. 激光快速成型过程及组织控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005. 38-57.
- 12 Chen Zhong. Temperature Measurement of Molten Pool in Laser Cladding Process[D]. Suzhou: Soochow University, 2006. 31-48.  
陈 钟. 激光熔覆熔池温度的测量[D]. 苏州: 苏州大学, 2006. 31-48.
- 13 Ning Guoqing, Zhong Minlin, Yang Lin, *et al.*. Research about close-loop control system during laser direct manufacturing metallic components[J]. *Applied Laser*, 2002, 22(2): 172-176.  
宁国庆, 钟敏霖, 杨 林, 等. 激光直接制造金属零件过程的闭环控制研究[J]. *应用激光*, 2002, 22(2): 172-176.
- 14 Zhou Guangcai, Sun Kangkai, Deng Qilin. The processing control of laser cladding[J]. *Electroma-Chining & Mould*, 2004, (2): 39-43.  
周广才, 孙康楷, 邓琦林. 激光熔覆中的控制问题[J]. *电加工与模具*, 2004, (2): 39-43.
- 15 D P Hand, M D T Fox, F M Haran, *et al.*. Optical focus control system for laser welding and direct casting[J]. *Opt Laser Eng*, 2000, 34(4-6): 415-427.
- 16 J Lin, W M Steen. An in-process method for the inverse estimation of the powder catchment efficiency during laser cladding [J]. *Opt Laser Technol*, 1998, 30(2): 77-84.
- 17 Shoujin Sun, Yvonne Durandet, Milan Brandt. Correlation between melt pool temperature and clad formation in pulsed and continuous wave Nd: YAG laser cladding of satellite 6 [C]. *Proceedings of the 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics*, 2004. 7-12.
- 18 Jiang Shujuan, Liu Weijun. Study on real-time measurement for laser molten pool temperature field by images colorimetric method[J]. *Information and Control*, 2008, 37(6): 747-751.  
姜淑娟, 刘伟军. 利用图像比色法进行激光熔池温度场实时检测的研究[J]. *信息与控制*, 2008, 37(6): 747-751.
- 19 Lei Jianbo, Yang Xichen, Wang Yunshan, *et al.*. Research on model of measuring and controlling temperature fields of molten pool in laser remanufacturing[J]. *J Tianjin Polytechnic University*, 2003, 22(5): 56-58.  
雷剑波, 杨洗陈, 王云山, 等. 激光再制造熔池温度场检测与控制方案研究[J]. *天津工业大学学报*, 2003, 22(5): 56-58.
- 20 Lei Jianbo, Yang Xichen, Chen Juan, *et al.*. Study on design of laser molten pool temperature field measurement software by CCD[J]. *Applied Laser*, 2007, 27(1): 5-8.  
雷剑波, 杨洗陈, 陈 娟, 等. 激光熔池 CCD 测温系统的软件设计研究[J]. *应用激光*, 2007, 27(1): 5-8.
- 21 Yu Dong, Zhong Minlin, Liu Wenjin, *et al.*. Realtime monitoring research of melt pool images in laser cladding process[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(s1): 86-90.  
于 栋, 钟敏霖, 刘文今, 等. 激光熔覆过程中熔池图像的实时检测[J]. *中国激光*, 2007, 34(s1): 86-90.
- 22 Wang Yuning. The Research About the Detecting Technology of Laser Pool Temperature Field[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2006. 25-34.  
王宇宁. 激光熔池温度场检测技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2006. 25-34.
- 23 Yu Lingling. Temperature Detection Software Development of Laser Molten Pool Based on High-Speed CCD[D]. Suzhou: Soochow University, 2009. 50-59.  
郁玲玲. 基于高速 CCD 的激光熔池温度检测软件开发[D]. 苏州: 苏州大学, 2009. 50-59.
- 24 Marius Jurca, Hans-Jurgen Langer. Temperature field measurement as quality assurance measure in case of laser material processing[J]. *Physics Procedia*, 2010, 5(B): 473-481.
- 25 B Grnenwald, S Nowotny, W Henning, *et al.*. New technological development in laser cladding[C]. *SPIE*, 1993, 2306: 934-944.
- 26 L Li, W M Steen, P Modern. Melt pool behaviour monitoring and adoptive control of laser surface treatment through machine vision[C]. *SPIE*, 1993, 2306: 372-381.
- 27 J Mazumder, D Dutta, N Kikuchi, *et al.*. Closed loop direct metal deposition; art to part[J]. *Opt Laser Eng*, 2000, 34(4-6): 397-414.
- 28 Guijun Bi, Andres Gasserb, Konrad Wissenbach, *et al.*. Identification and qualification of temperature signal for monitoring and control in laser cladding[J]. *Opt Laser Eng*, 2006, 44(12): 1348-1359.
- 29 D Salehi, M Brandt. Melt pool temperature control using LabView in Nd: YAG laser blown powder cladding process[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006, 29(3-4): 273-278.
- 30 Jiang Shujuan, Liu Weijun. Research on the temperature measuring and control of the molten pool in the metal powder laser shaping process[J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2007, 28(4): 5-8.  
姜淑娟, 刘伟军. 金属粉末激光成形过程中的熔池温度场[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(4): 5-8