

文章编号: 1001-3806(2018)06-0745-06

基于彩色 CCD 的激光熔覆熔池温度闭环控制研究

孙华杰¹, 石世宏^{1*}, 石拓², 傅戈雁¹, 陈磊¹

(1. 苏州大学 机电工程学院, 苏州 215021; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘要: 为了保持激光熔覆过程中熔池温度的相对稳定, 采用比色测温与比例-积分-微分(PID)控制策略相结合的方法实现了熔池温度的闭环控制, 搭建了一套基于双通道彩色 CCD 的激光熔覆成形熔池温度在线测控系统。将发射率 ε 纳入到待定系数 K 中, 建立了灰度比值与 K 的对应关系, 推导出了熔池温度的计算公式。基于 Socket 通信实现了温度在工控机与机器人控制器之间的信号传递, 设计了基于激光功率变化的温度控制器算法。结果表明, 此系统能实时准确地测量并控制熔池温度, 控制精度在 3% 以内; 将该系统运用于薄壁圆筒堆积成形实验中, 能够有效消除激光熔覆成形过程中的温度累积效应; 成形件底部与顶部外径仅相差 0.9mm, 成形件各处显微组织差异较小, 组织致密均匀。该控制方案具有实时性好、成本较低、便于集成应用等优点。

关键词: 激光技术; 比色测温; 熔池温度; 闭环控制

中图分类号: TN247

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.06.004

Research of close-loop control of molten pool temperature during laser cladding process based on color CCD

SUN Huajie¹, SHI Shihong¹, SHI Tuo², FU Geyan¹, CHEN Lei¹

(1. School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to maintain the molten pool temperature relatively stable in laser cladding process, close-loop control of molten pool temperature was realized by the combination of colorimetric temperature measurement and proportional-integral-differential (PID) control strategy. A set of on-line measurement and control system for molten pool temperature of laser cladding based on dual-channel color CCD was built. Emissivity ε was incorporated into the undetermined coefficient K , and the corresponding relationship between gray ratio and K was established, and the calculating formula for the temperature of the molten pool was derived. Based on Socket communication, the signal transmission between industrial personal computer and robot controller was realized, and the algorithm of temperature controller based on laser power variation was designed. The experimental results show that, the system can measure and control the temperature of molten pool in real time and accurately, the control accuracy within 3%. The system is applied to thin-walled cylinder stacking forming experiment, which can effectively eliminate the temperature accumulation effect during laser cladding forming process. The difference between the outer diameter of the bottom and top part of the forming part is only 0.9mm. The control scheme has the advantages of good real-time performance, low cost and easy integration.

Key words: laser technique; colorimetric thermometry; molten pool temperature; close-loop control

引言

激光熔覆成形(laser cladding forming, LCF)增材制造基于激光熔覆技术与快速成形技术。在成形过程

中,熔池的温度是影响成形稳定性、熔覆层质量、内应力、表面质量等的重要因素^[1-6]。影响熔池温度的参量有很多,如激光功率、送粉速率、离焦量和扫描速率等^[7]。因此,在 LCF 制造过程中,实现熔池温度的实时闭环控制对提高成形质量至关重要。

国内外现有激光熔覆成形过程熔池温度检测方法大致可分为两大类:基于红外测量和基于 CCD 测量。TAN 指出比色红外测温仪测温结果具有较高的准确性^[8]。CHEN 利用红外热像仪直观地反映出熔池温度

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675359)

作者简介:孙华杰(1992-),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆快速成形控制方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail:shishihong@suda.edu.cn

收稿日期:2018-01-29;收到修改稿日期:2018-03-12

的变化情况^[9]。JIANG 等人采用比色图像采集的方法,把 CCD 相机固定在激光光头上,减小了测量的误差^[10]。LEI 等人基于 CCD 开发了一套熔池温度动态检测系统,该系统具有一定的测温稳定性^[11-12]。相比红外测温,CCD 测温具有明显的成本优势,因此被广泛应用于多种不同的场合。对于熔池温度的控制,有研究人员指出,CCD 相机是获取激光熔覆成形过程中复杂信息的有效工具,但数字图像处理耗费时间,限制了熔覆过程速度^[13]。HU 等人设计了简单的比例-积分-微分 (proportional-integral-derivative, PID) 控制器,加入控制器后成形的薄壁墙可以控制形貌的变化^[14]。TOYSERKANI 和 KHAJEPOUR 利用含有带通滤波的 PID 控制器调整激光功率输入,提高了熔覆过程的几何尺寸精度^[15]。

光内送粉激光熔覆技术具有能量分布更均匀、光粉耦合度高、熔覆界面平整等优势。本文中针对光内送粉熔覆,研发了基于彩色 CCD 的激光熔池温度闭环控制系统。基于比色测温原理对熔池温度进行实时测量,确立了激光功率与熔池温度动态平衡关系,提出一种基于熔覆层平均温度改变激光功率的方法控制熔池温度。相较于基于高温计的测量结果调整工艺参量的控制方案,具有实时性好、成本较低、便于集成应用等优点。

1 实验条件

实验装置采用中空激光光内送粉熔覆喷头^[16-18],其原理如图 1 所示。平行激光束经反射镜组形成中空环形激光束,粉管从中轴线喷射粉末。光内送粉熔覆喷头具有扫描能量分布均匀^[17-18]、粉末挺直、粉末利用率高等优点。

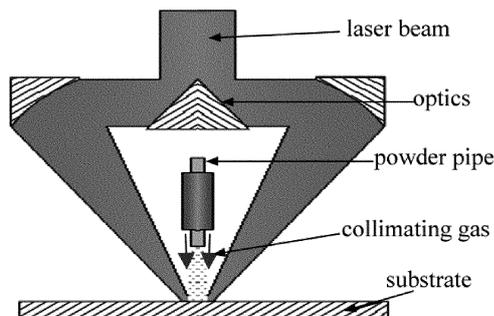


Fig. 1 Principle of hollow-laser beam inside powder feeding

实验基体材料采用 304 不锈钢。熔覆材料选用 Fe313 合金粉末,其粉末粒度为 $45\mu\text{m} \sim 74\mu\text{m}$,粉末各成分质量分数 w 为: $w(\text{C}) = 0.001$, $w(\text{Si}) = 0.025 \sim 0.035$, $w(\text{Cr}) = 0.13 \sim 0.17$, $w(\text{B}) = 0.005 \sim 0.15$,余量为 Fe。

图 2 为激光熔覆加工系统与熔池温度闭环控制系统的硬件组成。运动系统为 6 轴 KUKA 机器人 KR60-3F,采用 IPG YLS-2000-TR 光纤激光器,GTV PF2/2 型送粉器,保护气和载粉气均使用氮气。采用 2 台 Basler acA1300-30gc 彩色 CCD 工业相机作为图像传感器,采集帧率在 30 帧/s 左右。基于比色测温原理和图像处理实现熔池温度测量。工控机对采集到的熔池图像进行处理,提取需要的特征信息,计算出温度数据。通过 ProfiNet 将温度值实时反馈给机器人控制器,进而再控制机器人、激光器等执行机构,调整相应的工艺参量。其中,工控机与机器人控制器之间的温度数据传递是实现熔池温度闭环控制的基础。温度数值信号通信功能实现基于 .net 平台下 c#socket 接口编程^[19]。

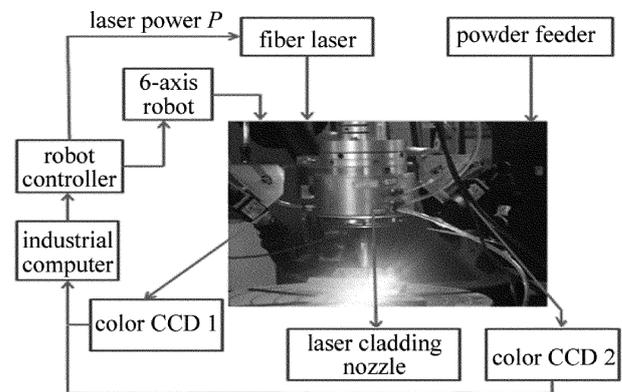


Fig. 2 Setup of system hardware

2 比色测温原理与模型的建立

比色测温法是通过测量物体(非黑体)在两个不同波长下辐射能量的比值,经校正后反推被测物体的温度。其理论基础来源于普朗克(Planck)黑体辐射定律,Planck 黑体辐射定律描述了黑体辐射与温度、波长之间的关系,即:

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

式中, λ 为波长, C_1 为普朗克第一辐射常数, $C_1 = 3.741833 \times 10^{16} \text{W} \cdot \text{m}^2$, C_2 为普朗克第二辐射常数, $C_2 = 1.438832 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$, $M(\lambda, \varepsilon)$ 表示黑体的辐射出射度。金属熔池被视作灰体,与同温度下的黑体辐射能量的比值为 $\varepsilon(\lambda, T)$,即为辐射率。当辐射波长 $\lambda < 800\text{nm}$ 且温度低于 3000K 范围内,普朗克黑体辐射定律可由维恩定律代替^[20],以 R 与 G 色度为例,得出基于彩色 CCD 的比色测温公式为:

$$T = \frac{C_2(\lambda_g^{-1} - \lambda_r^{-1})}{\ln L_{r,g} - \ln\left(\frac{k_r}{k_g}\right) - \ln\left[\frac{\varepsilon(\lambda_r, T)}{\varepsilon(\lambda_g, T)}\right] - 5\ln\left(\frac{\lambda_g}{\lambda_r}\right)} \quad (2)$$

式中, T 为待测熔池的热力学温度; C_2 为普朗克第二辐射常数; 红色窄带滤光片中心波长 $\lambda_r = 650\text{nm}$, 绿色窄带滤光片中心波长 $\lambda_g = 532\text{nm}$; $L_{r,g} = G_r/G_g$, 表示数字图像中 R, G 灰度比; k_r/k_g 与系统的辐射衰减、测量距离和 CCD 参量有关, 为待标定参量; 黑体辐射能量比值 $\varepsilon(\lambda, T)$ 表征灰体随 λ 及 T 变化发射或吸收能量的性能^[21]。

利用彩色 CCD 的比色测温公式进行温度测量计算时, 为了减小测温误差, 往往选择在镜头前加载 RGB 单色窄带滤光片和中性衰减片, 选取的窄带滤光片中心波长 $\lambda_r = 650\text{nm}$, $\lambda_g = 532\text{nm}$, 带宽均为 10nm , 中性衰减片衰减系数为 1% , 使得入射光以窄带波的形式进入 CCD 相机, CCD 相机更接近于理想的冲击响应函数。

令:

$$K = \ln\left(\frac{k_r}{k_g}\right) + \ln\left[\frac{\varepsilon(\lambda_r, T)}{\varepsilon(\lambda_g, T)}\right] + 5\ln\left(\frac{\lambda_g}{\lambda_r}\right) \quad (3)$$

简化为:

$$T = \frac{C_2(\lambda_g^{-1} - \lambda_r^{-1})}{\ln L_{r,g} - K} \quad (4)$$

简化后的比色测温公式将辐射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ 的变化纳入待定系数 K , K 由红外测温仪标定得到(如图 3 所示), ε 对结果的影响可忽略不计。通过运用最小二乘法拟合 K 与 $L_{r,g}$ 的函数关系(如图 4 所示), 从而确定熔池温度 T 与 $L_{r,g}$ 的函数关系。

对采集到的熔池图片进行图像处理, 图 5a ~ 图 5d 依次为熔池原图和经过灰度化、均值滤波以及二值化阈值分割后的图片。对分割后的区域提取最大灰度值

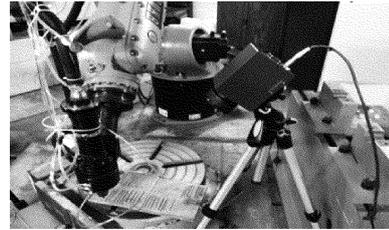


Fig. 3 Infrared thermometer site calibration

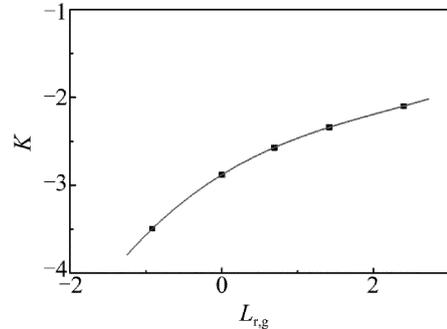


Fig. 4 Relationship between K and $L_{r,g}$

Table 1 Relationship between gray value and temperature

R gray value	G gray value	gradation ratio	calibration temperature/ $^{\circ}\text{C}$
73	67	1.1	1300
98	70	1.4	1400
122	72	1.7	1500
159	75	2.1	1600
201	77	2.6	1700
254	81	3.1	1800

作为比色测温公式中的 R 灰度。由表 1 可见, 当温度达到 1800°C 时, R 灰度值已经接近灰度值上限 255, 趋于饱和, 因此本例中的测温范围为 $1300^{\circ}\text{C} \sim 1800^{\circ}\text{C}$ 。若要进一步扩大测温范围, 需要在镜头前加载更高效率的衰减片和调整曝光时间, 调整光圈进一步减少进光量来实现。如图 4 所示, K 与 $L_{r,g}$ 呈良好的线性关系, 运用最小二乘法拟合灰度比值 $L_{r,g}$ 与待定系数 K

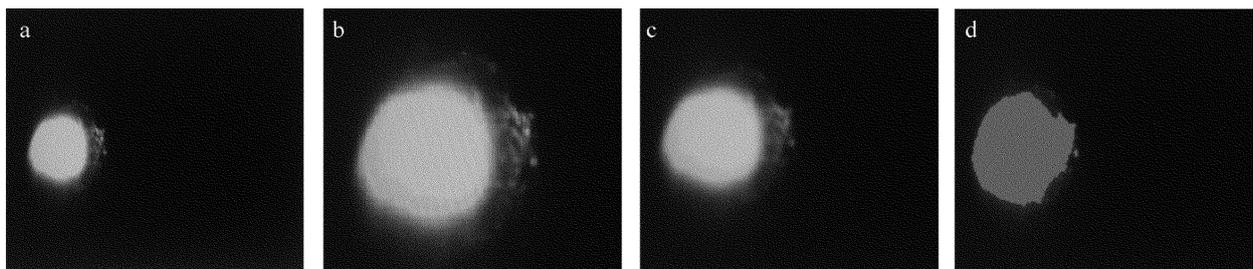


Fig. 5 Digital image processing of molten pool

a—origin image b—grayscale c—mean filter d—threshold segmentation

的 3 次多项式, 给出对应关系式:

$$K = -5.944 + 3.3952\ln L_{r,g} - 0.9515(\ln L_{r,g})^2 + 0.108(\ln L_{r,g})^3 \quad (5)$$

可得熔池温度的计算公式为:

$$T = C_2(\lambda_g^{-1} - \lambda_r^{-1}) / \{ \ln L_{r,g} - [-5.944 + 3.3952\ln L_{r,g} - 0.9515(\ln L_{r,g})^2 + 0.108(\ln L_{r,g})^3] \} \quad (6)$$

3 温度控制器设计

中空环形激光的能量密度公式为^[22]:

$$E = P/(Dv) \quad (7)$$

式中, E 为激光能量密度, P 为激光功率, D 为环形光斑外圆直径, v 为扫描速率。可知,激光能量密度 E 与激光功率 P 成正比,与光斑外圆直径 D 、扫描速率 v 成反比。

设计单道熔覆基础实验,实验在基体上进行,熔覆单道长度为50mm,离焦量为-3mm,扫描速率为6mm/s。在不同激光功率作用下,探究熔池温度与激光功率的动态关系,工控机软件记录了单道熔覆过程中的熔池温度变化情况。以采集到的数据编号为横轴,熔池温度为纵轴,得到不同功率下的熔池温度曲线(如图6所示)。

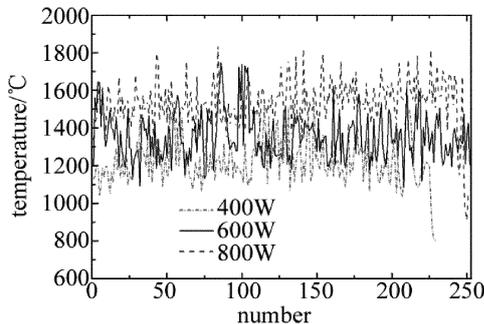


Fig. 6 Relationship between molten pool temperature and laser power

由图6可见,单一功率作用下的熔覆层各点散热状况不同,温度呈现动态变化,且没有体现出良好的规律性。但结合表2中的数据发现,当激光功率从400W变化到800W,整个熔覆层的温度均值 T_a 从1221.9℃递增到1531.6℃,最大值 T_{max} 从1562.3℃递增到1836.4℃,体现出良好的线性关系, T_{min} 为温度最小值。因此,基于多个离散点求温度均值作为改变激光功率的依据来控制熔池温度具有一定的可行性,可尝试使用PID方法控制熔池温度。

Table 2 Statistical results based on Fig. 6

laser power/W	$T_a/^\circ\text{C}$	$T_{max}/^\circ\text{C}$	$T_{min}/^\circ\text{C}$	$dT/^\circ\text{C}$
400	1221.9	1562.3	858.1	704.2
600	1358.1	1747.9	1093.2	654.7
800	1531.6	1836.4	958.3	878.1

设计PID控制器,进行激光功率-熔池温度的单输入控制实验。设 T_s 为设定温度, T_a 为当前熔覆过程中多个采样点温度的平均值。以层为周期进行反馈控制, k 为当前熔覆层号,则第 k 层实际温度与设定温度的误差 $e(k)$ 为:

$$e(k) = T_s(k) - T_a(k) \quad (8)$$

在实际堆高过程中,通过每层修正激光功率来使实际温度 T_a 趋近于 T_s ,每层需要的功率变化量 ΔP 可以表达为PID算法的差分方程:

$$\Delta P = K_p e(k) + K_i \sum_{m=1}^k e(m) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (9)$$

式中, K_p 为比例增益, K_i 为积分增益, K_d 为微分增益。比例项用于修正激光功率 $P(k)$, K_p 一般取负值,该实验选取的比例系数为-0.0001。积分项用于消除系统累积误差,使每层熔覆堆积的 T_a 逐渐逼近期望值 T_s 。微分项用于累计误差变大之前引入一个修正信号,减少算法的调节时间。当 $T_a < T_s$ 时,下一层激光功率增大,温度升高;反之,激光功率减小,温度降低。整个熔覆过程中,激光功率的PID控制算法表达式为:

$$P(k+1) = P(k) + K_p e(k) + K_i \sum_{m=1}^k e(m) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (10)$$

4 圆筒成形实验与分析

采用Fe313粉末分别堆积了直径45mm的圆筒,最终成形实体如图7所示。其中图7a未加入温度控制,图7b加入温度控制。相同的工艺参量设定为:离焦量-3.5mm,扫描速率6mm/s,送粉速率8g/min,激光功率920W,逐层向上堆积。在多层熔覆过程中,图7b设定温度1700℃,软件记录其熔池平均温度与激光功率随熔覆层变化的曲线,如图8所示。堆积初期,由于基体没有经过预热其温度为室温。为了改善熔覆层与基体之间的冶金结合质量,防止后期开裂,采用相对较高的激光功率920W。可以看到,前15层熔覆层平均温度逐层稳定上升,这是因为随着堆积层数的增加,熔池的散热方式由初期的3维散热变为2维散热,熔池热量不断累积,直至实际温度 T_m 达到1700℃。从第16层熔覆层开始,开启PID控制器,由于 T_m 始终大于1700℃,激光功率逐层降低,每层大约降低10W~

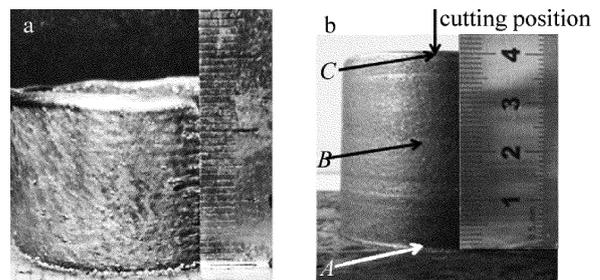


Fig. 7 Comparison of the formed parts

a—the formed part without temperature control b—the formed part with temperature control

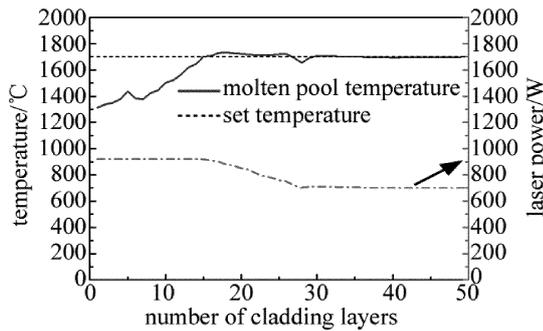


Fig. 8 Relationship between average molten pool temperature, laser power and the number of cladding layers

20W。27 层左右开始出现 T_m 小于设定值 T_s ，接下来两层的激光功率略微有所增加，直至 30 层左右熔覆层温度基本保持稳定，达到热平衡状态，激光功率也基本不再变化，稳定在 700W 左右。热平衡状态下的激光功率相较于初始的激光功率下降 220W 左右。实验结果表明，在不同工艺条件作用下，多层熔覆成形达到热平衡所需要的层数不同且与控制器算法的比例系数有关。采用温度控制的 3 维堆积成形件与没有采用温度控制 3 维堆积成形件相比，完全没有出现熔道截面变宽的情况，熔覆层宽度上下相对均匀，成形件表面粗糙度明显降低，无明显的粉末粘附，无过熔、欠熔现象发生。

通过表 3 中的数据分析发现，未采用温度控制的成形件在 24.8mm 的高度距离上，底部与顶部外径相

Table 3 Parameters comparison of the formed parts with controller and without controller

parameter	without controller	with controller
height/mm	24.8	41.0
bottom diameter/mm	35.7	45.5
top outer diameter/mm	38.5	44.6
middle diameter/mm	38.1	45.1

差 2.8mm。而采用温度控制的成形件在 41.0mm 的高度距离上，底部与顶部外径仅仅相差 0.9mm。后者的效果明显优于前者。实验表明，该方案在消除熔池温度热累积效应上取得了良好效果，成形件尺寸精度明显提高。

在图 7b 所示圆筒成形件中沿箭头方向切开，取 A, B, C 3 个位置制备金相试样，并对试样进行打磨、抛光和腐蚀处理。在徕卡 DM-IRM 型金相显微镜下进行观察，A, B, C 3 个位置得到的结果分别如图 9a、图 9b、图 9c 所示。图 9a 为成形件与基板结合区，金属粉末快速凝固快速冷却，晶粒垂直基板生长，最终形成树枝晶组织。图 9b 对应圆筒中部组织，热量累积多，形成的组织较为粗大、疏松。图 9c 为圆筒顶部组织，树枝晶生长方向有所不同，晶粒尺寸在 $10\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ 范围内，属于细晶组织。成形件整体无明显气孔、裂纹等缺陷，组织致密，具有良好的冶金质量。

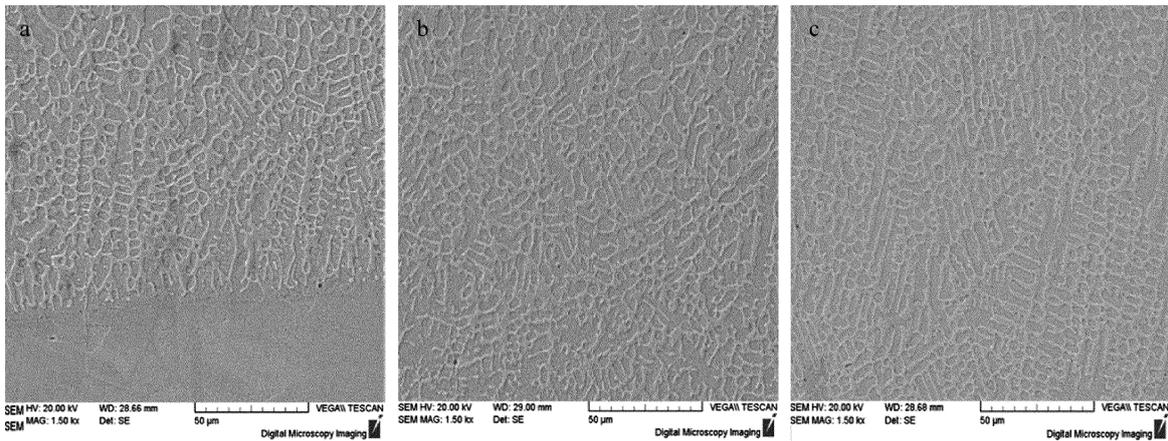


Fig. 9 Scanning electron microscope images marked A, B, C in Fig. 7b

5 结论

(1) 研发了一套基于双通道彩色 CCD 的激光熔覆成形熔池温度在线测控系统，结构简便、成本较低、易于安装。利用 Socket 类实现温度数值信号在工控机与机器人控制器之间的通信，建立构建了温度闭环控制系统。

(2) 选用衰减系数为 1% 的中性衰减片，扩大了可

供温度标定的范围。利用双波长比色测温原理测出激光熔覆过程中的熔池温度，能够实时反映出熔池温度的变化情况。

(3) 设计了温度 PID 控制器，加入了功率调整的圆筒堆积成形实验，实验结果表明，调整激光功率输出能够有效地消除了温度累积效应，成形件尺寸精度明显提高，表面粗糙度降低。

(4) 成形件整体无明显气孔、裂纹等缺陷，组织致

密,具有良好的冶金质量。

参 考 文 献

- [1] CHOI J, CHANG Y. Characteristics of laser aided direct metal/material deposition process for tool steel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(4):597-607.
- [2] MAZUDER J, DUTTA D, KIKUCHI N, *et al.* Closed loop direct metal deposition: art to part[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34(4):397-414.
- [3] HUANG W D. Laser solid forming technology: Rapid freeform fabrication of high performance and compact metallic component[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007:1-4 (in Chinese).
- [4] DU Q, HANG X L, WANG M D, *et al.* Mechanism and experimental study of laser milling on laser cladding parts[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101403 (in Chinese).
- [5] JIANG Y J, LU B H, FANG X W, *et al.* 3-D printing-based internet collect-manufacturing mode[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2016, 22(6):1424-1433 (in Chinese).
- [6] SHI T, LU B H, WEI Zh Y, *et al.* Research of closed-loop control of deposition height in laser metal deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7):0702004 (in Chinese).
- [7] SONG L, BAGAVATH-SINGH V, DUTTA B, *et al.* Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1/4):247-256.
- [8] TAN H. Temperature measurement and research on microstructure controlling in laser rapid forming[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005:38-57 (in Chinese).
- [9] CHEN Zh. Temperature measurement of molten pool in laser cladding process[D]. Suzhou: Soochow University, 2006:31-48 (in Chinese).
- [10] JIANG Sh J, LIU W J. Study on real-time measurement for laser molten pool temperature field by images colorimetric method[J]. Information and Control, 2008, 37(6): 747-751 (in Chinese).
- [11] LEI J B, YANG X Ch, WANG Y Sh, *et al.* Research on model of measuring and controlling temperature fields of molten pool in laser remanufacturing[J]. Tianjin Polytechnic University, 2003, 22(5): 56-58 (in Chinese).
- [12] LEI J B, YANG X Ch, CHEN J, *et al.* Study on design of laser molten pool temperature field measurement software by CCD[J]. Applied Laser, 2007, 27(1):5-8 (in Chinese).
- [13] BI G J, SCHÜRMAN B, GASSER A, *et al.* Development and qualification of a novel laser-cladding head with integrated sensors[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(3):555-561.
- [14] HU D, KOVACEVIC R. Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(1):51-60.
- [15] TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A. A Mechatronics approach to laser powder deposition process[J]. Mechatronics, 2006, 16(10): 631-641.
- [16] WANG C, SHI Sh H, FANG Q Q, *et al.* Research on laser cladding forming of close-packed multivariant twisty thin-wall parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6):0602004 (in Chinese).
- [17] DENG Zh Q, SHI Sh H, ZHOU B, *et al.* Laser cladding forming of arcuate cantilevered entity part[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(10):1006004 (in Chinese).
- [18] SHI T, WANG Y Q, LU B H, *et al.* Laser cladding forming of cantilevered thin-walled part based on hollow-laser beam inside powder feeding technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1003003 (in Chinese).
- [19] XU J M, PAN X F. Research of robot monitoring system based on socket communication [J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(7):70-73 (in Chinese).
- [20] HUANG J, ZHANG K, ZHU X P, *et al.* Calibration of CCD temperature measurement system based on RGB digital filtering in laser cladding[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(5):968-973 (in Chinese).
- [21] LI J J. An intensity fusion method applied to color CCD-based colorimetric temperature measurement [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(1):177-179 (in Chinese).
- [22] MENG W D, SHI Sh H, FU G Y, *et al.* Experimental study about vertical surface accumulation with coaxial inside-beam power feeding [J]. Laser Technology, 2015, 39(5): 594-597 (in Chinese).