

成分/性能连续变化梯度材料激光成形送粉系统设计

武 强, 王旭葆, 杨武雄, 肖荣诗, 左铁钊
(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘 要: 针对成分及性能连续变化功能梯度材料(以及功能零件)激光成形制造工艺对多粉末束流成分及送粉量需实时变化的难点,研制开发粉末输送量连续可变的四路联动送粉系统;阐述了该系统的机械设计及电气控制原理;通过 Fe313 合金粉末输送工艺试验,实现送粉量的多斜率线性函数连续变化;使用 Ni25 自熔合金粉末,采用 6 kW CO₂激光器,进行熔覆工艺试验,获得了厚度连续变化的单道熔覆层。

关键词: 功能梯度材料; 送粉系统; 激光成形制造

中图分类号: U 461; TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2014)05-0648-05

Design of Powder Feeding System for Components/Properties Changed Continually FGM Fabricated by Laser Forming Processes

WU Qiang, WANG Xu-bao, YANG Wu-xiong, XIAO Rong-shi, ZUO Tie-chuan
(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To solve the difficulty that the mixing proportioning of various powders should be changed continuously to satisfy the requirement of FGM (and functional part) whose components/properties should be changed continually fabricated by laser forming processes, the four channels linkage powder feeding system was designed and manufactured, and the value of powder output of each channel can be changed continually. This paper elaborated the theory of the mechanism design and electric control of powder feeding system. By which the relevant tests were made with Fe313 alloy powder, the experimental results show that the value of powder output can be changed with linear functions having the different slope lines over time. With this powder feeding system, the thickness of cladding layer changed continuously was achieved in 6 kW CO₂ laser cladding experiment with Ni25 alloy powder.

Key words: functionally gradient materials (FGM); powder feeding system; laser forming fabrication

功能梯度材料(functionally gradient materials, FGM)由于其成分及性能的梯度变化,所以具备其他均质单一材料及涂层材料所不具备的综合性能优点^[1]. 采用基于同步送粉激光熔覆工艺的激光成形制造技术制造 FGM 材料成为近些年的研究热点,目前国内外相关研究机构已经制备出沿堆积方向逐层呈梯度变化的梯度材料^[2-6]. 制备功能梯度材料的

目的是获取功能梯度零件,或者通过与其他零部件组合连接形成具有一定综合性能的功能组件. 大功率激光制造技术是先进制造的发展方向,将引领制造技术进入激光制造的时代,并带来产品设计、制造工艺和生产观念的巨大变革^[7].

利用激光成形技术采用加成方式制造功能组件的原理见图 1,通过设计功能零件的三维模型,根据

收稿日期: 2013-06-05

基金项目: 国家“973”计划资助项目(2A101012201101)

作者简介: 武 强(1975—),男,助理研究员,主要从事激光加工技术及外围系统方面的研究, E-mail: jlwuqiang@bjut.edu.cn

不同的功能部位所具有的性能要求设计相应的粉末配比方案. 结合三维激光成形制造技术, 通过对多粉末材料的成分选择及配比的连续可控变化, 实现熔池内成分的实时变化. 通过控制成形轨迹及相关参数, 在熔池凝固成形后, 形成零件设计中相应的耐热区域和耐磨区域, 再结合逐层堆积(三维成形)叠加成形技术, 制造出具有耐热和耐磨功能的功能零件. 在该过程中, 成分及性能不但需要沿着堆积方向连续变化, 也需要在熔覆过程中实现连续变化, 这就对粉末输送设备提出了熔覆过程中送粉量可连续变化及可实现多种粉末实时配比的要求. 在前期大量分析工作基础上, 设计了一种送粉量可连续变化的四路联动系统, 可实现多粉末送粉量实时变化控制.



图 1 采用激光成形技术制造功能零件示意图

Fig. 1 Scheme of laser forming technology to fabricate functional part

1 送粉系统原理与软硬件设计

1.1 粉末输送装置的工作原理

本送粉系统的送粉装置采用负压吸附正压输送混合气力输送方式的工作原理(如图 2 所示), 主要包括粉末铺展与输送、送粉气体的输入与输出、送粉气体输送金属粉末 3 个部分. 其中, 送粉气体通过进气部件进入到粉末输送装置内的密封腔内, 经过出粉部件与粉末输出部件之间的缝隙后, 通过粉末输出部件流出. 由于送粉气体的流动, 在粉末输出部件通道末端和出粉部件之间形成一个负压区. 粉末输出部件末端的通道相当于负压气力输送系统的吸嘴, 而出粉部件孔道则相当于负压气力输送系统的料斗^[8]. 出粉部件孔道内的金属粉末在送粉气体负压吸附的作用下, 被吸入到粉末输出部件的通道内, 此过程为负压输送过程; 在粉末输出部件通道内形成的粉气两相流则是在密封腔内正压送粉气的作用下, 沿着送粉管路输送至送粉喷嘴, 此过程为正压输送过程. 所以按气力输送装置类型来分, 该送粉系统属于混合气力输送系统.

送粉块、粉末承载盘和出粉块是粉末铺展和输送的关键器件. 在送粉过程中, 送粉块和出粉块同粉末承载盘之间发生摩擦运动, 所以三者之间的配

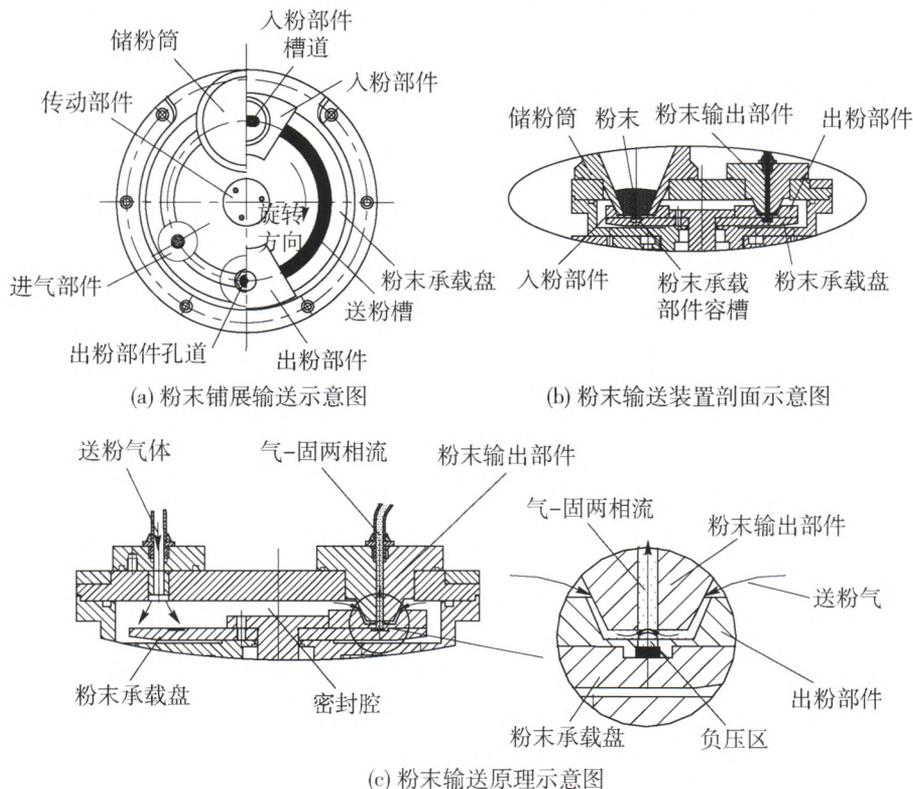


图 2 气相介质粉末输送原理图

Fig. 2 Principle diagram of powder conveying with the gas

合间隙及相关尺寸直接影响粉末输送精度和稳定性,三者之间配合关系如图3所示. 其中: W_1 为粉末承载盘槽道宽度; H_1 为粉末承载盘槽道深度; h_1 为送粉块底部铺展槽深度; h_2 为出粉块底部收集槽深度; D_1 为送粉块底部铺展槽宽度; D_2 为出粉块底部铺展槽宽度; t_1 为出粉块与出粉间负压区间隙; H_1 、 h_1 和 h_2 以及 D_1 、 D_2 和 W_1 之间的数值决定出粉块铺展在粉末承载盘槽道内的粉末是否能完全由出粉块输出,三者之间配合关系及运行效果见表1. t_1 数值决定着出粉块与出粉件之间负压区的大小,在固定送粉气体流量的前提下,其数值直接决定着金属粉末是否能被负压吸出,完成粉末输送. 采用 N_2 气作为输送气体,经过0.4 MPa二次降压,在保证粉末输出的情况下,送粉气流量及试验效果见表2,通过表2可知,随着 t_1 数值的增加,送粉气流量大幅增加,在增加至2 mm时,在现有流量计的量程范围内,无法完成粉末输送. 如果 t_1 数值过小时,则无法完成输送,分析其原因,是由于缝隙过小,导致送粉气在流出出粉件时流量减少,出粉块和出粉件之间的负压区过小,无法完成对出粉块内金属粉末的吸附输出.

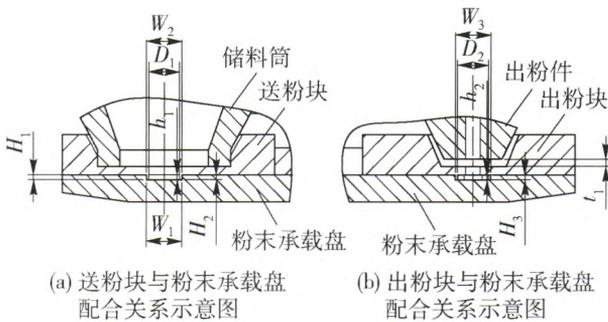


图3 送粉块、粉末承载盘和出粉块配合关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of assemble relationship of feeding part, powder loading plate and spraying part

1.2 粉末输送装置的工作原理

送粉系统设计原理如图4所示. 送粉部件(粉末承载盘)转速(转速决定送粉量)由伺服电机提供. 通过人机交互界面(human computer interface, HMI)设置粉末输送参数,然后HMI根据参数计算出电机转动函数,并将其传送给PLC,PLC系统根据电机转动函数计算出相应的脉冲输出函数,并将其输送给伺服电机驱动器. 伺服电机驱动器设置为脉冲驱动模式,其线数为100 000 p/r. 根据各路送粉参数计算转动速度函数 $V(t)$,并将其传送给PLC系统,后者将函数 $V(t)$ 转化为脉冲函数 $P(t)$ 后输送

表1 配合关系及运行效果

Table 1 Cooperate relationship and running effect

项目	数值及相应公差/mm	试验效果
H_1	H	送粉过程运转平稳,粉末承载盘槽道内的粉末可完全由出粉块输出
h_1	$H - 0.1$	
h_2	$H + 0.1$	
H_1	H	粉末承载盘槽道内的粉末在进入出粉块时,因为 $h_2 < h_1$,粉末会溢出粉末承载盘槽道,对出粉块和送粉块造成磨损,进而影响送粉过程稳定性
h_1	$H + 0.1$	
h_2	$H - 0.1$	
W_1	D	送粉过程运转平稳,粉末承载盘槽道内的粉末可完全由出粉块输出
D_1	$D - 1.3$	
D_2	$D - 1.2$	
W_1	D	粉末承载盘槽道内的粉末在进入出粉块时,因为 $D_2 < D_1$,粉末会在出粉块凸缘外侧溢出粉末承载盘槽道,对出粉块和送粉块造成磨损,影响送粉过程稳定性
D_1	$D - 1.2$	
D_2	$D - 1.3$	

表2 不同 t_1 数值时送粉气流量及试验效果

Table 2 Gas flow for powder feeding and testing results with different t_1 values

t_1 /mm	送粉气流量/ ($L \cdot h^{-1}$)	试验效果
0.2	150	不能输送
0.5	150	输送平稳,输送距离大于10 m
1.0	250	输送平稳
1.5	400	输送平稳
2.0	500	不能输送

给各路的伺服驱动器. 将伺服驱动器工作模式设定为脉冲驱动模式,其线数设定为100 000 p/r,伺服驱动器根据脉冲函数 $P(t)$ 驱动各自的伺服电机以设定的转速函数 $V(t)$ 带动粉末承载盘转动,实现粉末送粉质量 $W(t)$ 变量输送. 其中,在HMI界面上设置A、B、C、D四路粉末输送装置参数设置窗口,可通过参数设置及面板控制各路送粉装置的工作情况,实现联动运行. 每路粉末输送装置设置1~7段送粉参数,每段粉末输送参数有3个:送粉开始速度 V_s 、送粉终止速度 V_E 、送粉时间 T ;在该段内粉末输送总质量为 $W(t) = \alpha \rho_p S D \left(\left(\frac{V_s - V_E}{T/60} \right) t + V_s \right)$,令

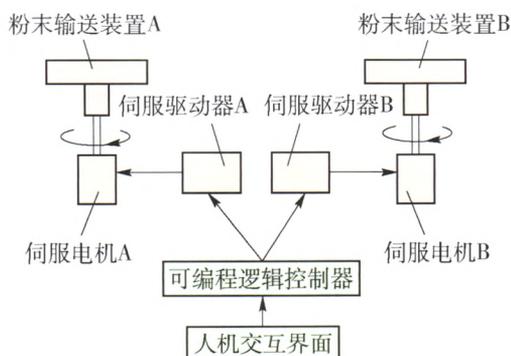


图4 多路送粉系统的数控原理图

Fig.4 Electrical control theory of the multipath linkage powder delivery system

$q = \alpha \rho_p S D$, 其中, α 为修正系数, 同粉末铺展零件、粉末收集零件及粉末承载盘的加工配合误差及精度有关; ρ_p 为粉末体积密度 (g/mm^3); S 为粉末承载盘送粉槽横截面积 (mm^2); D 为粉末承载盘送粉槽中心直径 (mm); 所以 $W(t) = q \left(\left(\frac{V_s - V_E}{T/60} \right) t + V_s \right)$, 对于特定送粉装置, 该数值为常数. V_s 数值范围为 $0.1 \sim 20 \text{ r}/\text{min}$; V_E 数值范围为 $0.1 \sim 20 \text{ r}/\text{min}$; t 为运转时间, 其数值范围为 $0.1 \sim 43\ 200 \text{ s}$; 对于某一送粉装置而言, 如果 $V_{s2} = V_{E1}$, $V_{s3} = V_{E2}$, \dots , 则粉末输送量函数 $Q(t) = \int_0^t W(t) dt$, 如果将 V_{sn} ($n = 1, \dots, 8$) 设置为线性插值节点, 则理论上可以输送任何可以牛顿插值拟合的粉末输送函数^[7]. 研制的四路粉末输送系统如图5所示.



图5 成分可连续变化的四路送粉系统

Fig.5 Photo of four channels powder feeding system

2 粉末输送及熔覆试验

2.1 多段线性变化粉末输送试验

粉末种类为 Fe313, 粒度为 $150 \sim 260 \mu\text{m}$; 送粉

盘容积为 $3.63 \text{ g}/\text{r}$; 采用 N_2 气作为输送气体, 送粉气流量为 $150 \text{ L}/\text{h}$; 测量容器为上部开有出气孔的容器; 测量仪器为电子天平、秒表. 输出管路为尼龙管, 内径为 4 mm , 长度为 4 m ; 测量方法为每间隔 30 s 读取电子天平实时数值. 各段设定数值为: $V_{s1} = 1 \text{ r}/\text{min}$, $V_{E1} = 3 \text{ r}/\text{min}$, $T_1 = 120 \text{ s}$; $V_{s2} = 3 \text{ r}/\text{min}$, $V_{E2} = 6 \text{ r}/\text{min}$, $T_2 = 240 \text{ s}$; $V_{s3} = 6 \text{ r}/\text{min}$, $V_{E3} = 0 \text{ r}/\text{min}$, $T_3 = 240 \text{ s}$. 送粉曲线如图6所示, 送粉量测量数据如表3所示. 其中: 测量容器净质量 G_i 为 206.79 g ; G_0 为电子天平显示的容器质量测量值; G' 为粉末输送量的理论值; G 为粉末输送量的测量计算值, $G = G_0 - G_i$; ΔG 为粉末输送量误差, $\Delta G = (G - G')/G$.

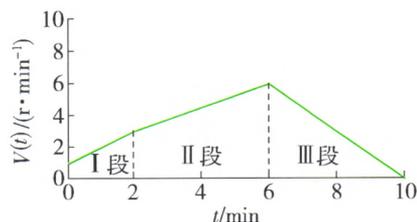


图6 送粉量测试曲线

Fig.6 Powder feeding testing curve

表3 送粉量测量数据

Table 3 Data of powder feeding amount

t/min	G_0/g	G/g	G'/g	ΔG
0.5	209.12	2.33	2.29	0.026
1.0	212.38	5.59	5.44	0.026
1.5	216.53	9.74	9.53	0.022
2.0	221.77	14.98	14.52	0.031
2.5	228.00	21.21	20.31	0.043
3.0	234.69	27.90	26.77	0.040
3.5	242.34	35.55	33.92	0.046
4.0	250.51	43.72	41.74	0.045
4.5	259.35	52.56	50.25	0.044
5.0	268.96	62.17	59.44	0.044
5.5	279.74	72.95	69.31	0.050
6.0	290.57	83.78	79.86	0.047
6.5	301.39	94.60	90.07	0.048
7.0	310.37	103.58	98.91	0.045
7.5	317.69	110.90	106.40	0.041
8.0	324.27	117.48	112.53	0.042
8.5	328.68	121.89	117.29	0.038
9.0	332.56	125.07	120.69	0.040
9.5	334.84	127.05	122.74	0.041
10.0	335.14	127.35	123.42	0.038

2.2 激光熔覆试验

粉末材料选用 Ni25 自熔合金粉末,其粉末颗粒度为 150 ~ 250 目,粉末输送气体采用纯度为 99.95% 的工业氩气.粉末输送参数为 $V_s = 0.5 \text{ r/min}$, $V_e = 4 \text{ r/min}$, $T = 30 \text{ s}$,本试验选用旁轴送粉喷嘴进行熔覆试验.工艺参数如下:激光器为德国通快公司生产的快速轴流 6 kW CO_2 激光器,其 $K_f = 8.67 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$,波长为 $10.6 \mu\text{m}$,功率为 4 200 W,离焦量 $\Delta f = 55 \text{ mm}$;机床运动速度(熔覆速度)为 300 mm/min,基体采用 45#钢,外形尺寸为 $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$.获得熔覆层纵向横截面如图 7 所示.

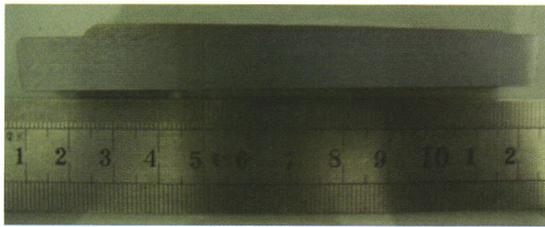


图 7 厚度线性增加的熔覆层

Fig.7 Cladding specimen with thickness of cladding layer increases linearly

由熔覆层界面知,熔覆层高度呈线性增加.在长度方向上均匀截取 8 处(间隔 1 cm)位置,使用游标卡尺测量试样高度,其数值如图 8 所示.

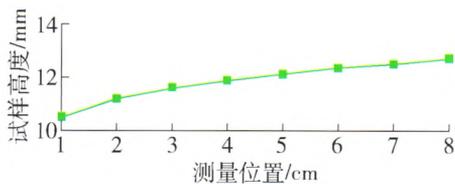


图 8 熔覆试样高度(包括基体和熔覆层厚度)曲线

Fig.8 Curve of height of cladding specimen (including the thickness of cladding layer and substrate)

3 结论

1) 在优化送粉装置相关参数后,送粉装置在设定粉末承载盘运动速度变化曲线的条件下,粉末输送量呈连续变化,运行平稳.

2) 设计开发的四路联动送粉系统送粉性能满足功能梯度材料对送粉设备粉末输出连续变化的输出性能要求.

3) 使用该送粉系统,通过激光熔覆方法制备的

熔覆层厚度呈连续变化.

参考文献:

- [1] 张魁武. 国外激光熔覆应用和直接熔覆金属零件及梯度材料制造[J]. 金属热处理, 2002, 27(7): 26-29.
ZHANG Kui-wu. Industrial applications of laser clad and laser deposited metal parts and graded materials[J]. Metal Heat Treatment, 2002, 27(7): 26-29. (in Chinese)
- [2] ZHANG Y Z, WEI Z M. Characterization of laser powder deposited Ti-TiC composites and functional gradient materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 20(6): 438-444.
- [3] TRAINI T, MANGANO C, SAMMONS R L, et al. Direct laser metal sintering as a new approach to fabrication of an isoelastic functionally graded material for manufacture of porous titanium dental implants [J]. Dental Materials, 2008, 24(11): 1525-1533.
- [4] QU H P, LI P, ZHANG S Q. Microstructure and mechanical property of laser melting deposition(LMD) Ti/TiAl structural gradient material[J]. Materials and Design, 2010, 31(7): 574-582.
- [5] PEI Y T, HOSSON M. Functionally graded materials produced by laser cladding[J]. Acta Mater, 2000, 48(8): 2617-2624.
- [6] 张永忠, 席明哲, 石力开. 激光熔覆沉积制备多层 316L 不锈钢—Stellite31 合金梯度功能材料[J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 45-49.
ZHANG Yong-zhong, XI Ming-zhe, SHI Li-kai. Multi-layer functional gradient materials of 316L stainless steel to stellite31 alloy prepared by laser clad deposition [J]. Metal Heat Treatment, 2007, 32(9): 45-49. (in Chinese)
- [7] 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): 104-108.
ZUO Tie-chuan, CHEN Hong. Green manufacture in 21 century—laser manufacturing technology and application [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 104-108. (in Chinese)
- [8] 林江. 气力输送系统流动特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学机械与能源工程学院, 2004.
LIN Jiang. Research on the flow property in the pneumatic conveying system [D]. Hangzhou: College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, 2004. (in Chinese)

(责任编辑 刘 潇)