

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0167-04

激光净成形制造金属零件过程稳定性研究

李延民, 黄小平, 刘 勇, 蔡国双, 彭志学

(通用电气(中国)研究开发中心有限公司, 上海 201203)

摘要 研究了金属零件的激光净成形过程的稳定性, 利用闭环控制系统对成形过程进行实时监测和闭环控制, 并通过该系统研究了工艺参数对成形过程的影响, 发现当实际堆积厚度大于预设的堆积厚度时, 成形过程能够自动维持在稳定的状态; 而当实际堆积厚度小于预设的堆积厚度时, 实际堆积厚度将逐渐减小, 因而成形过程逐渐偏离稳定状态, 最终导致成形过程无法继续进行。通过实验设计系统研究了工艺参数对成形特性的影响规律, 并在实验过程中进行闭环控制, 实时调整预设堆积厚度与实际堆积厚度相等, 得到了最大堆积厚度的传递函数。参考传递函数合理选择工艺参数, 成功制造出了具有很好宏观外形和表面质量的镍基高温合金零件。

关键词 激光技术; 激光净成形; 金属零件; 镍基高温合金

中图分类号 TN249 文献标识码 A

Process Stability of Laser Net Shape Manufacturing of Metal Components

LI Yan-min, HUANG Xiao-ping, LIU Yong, CAI Guo-shuang, PENG Zhi-xue

(GE (China) Research and Development Center Co. Ltd, Shanghai 201203, China)

Abstract Laser Net Shape Manufacturing (LNSM) of metal components was investigated. The LNSM system was integrated with on-line monitoring and closed-loop control system through which the process of LNSM was studied. It was found that when the real deposited height was larger than the preset layer thickness, the process could be kept stable automatically. When the real deposited height was smaller than the preset layer thickness, the deposition height became smaller and the process gradually became unstable and the process can not go on finally. The influence of processing parameters on the forming characteristics was systematically investigated by design of experiment. By online adjusting the layer thickness to be equal to the real deposition height through applying closed-loop control algorithm, the transfer function of maximum deposition height was obtained. With the guidance of the transfer functions, metal components of nickel-based superalloy with good shape and surface quality were fabricated.

Key words laser technique; laser net shape manufacturing; metal components; nickel based superalloy

1 引 言

激光净成形技术(LNSM)是近年来国内外发展非常迅速的一项先进的激光加工技术^[1]。该技术已引起了世人的高度重视,并取得了迅速的发展^[2~6]。

尽管已有很多关于激光净成形的研究报道,但对于如何适当地选择工艺参数以获得好的成形效果却少有报道,特别是如何选择工艺参数使成形过程保持稳定的状态。以往在解决这一问题时往往通过大量的实验以找到某一工艺条件下的合理工艺参数,一旦工艺条件发生改变,往往又需要新的探索过程。虽然已有一些关于一定条件下成形传递函数方面的研究^[7,8],但关于如何定量描述成形过程的稳定性这一问题却很少有报道。而一旦解决好了成形过程的稳定性问题,就可以通过合理设置工艺参

数确保最终获得的零件的精度和质量,因而稳定性对整个成形过程具有重要的意义。

因此,本文利用闭环监控系统对镍基高温合金的激光净成形过程的稳定性进行了深入研究,探索工艺参数对成形过程稳定性的影响规律。通过实时调整每层之间的抬升量获得了最大堆积厚度的传递函数,并利用传递函数合理选择了工艺参数,成功进行了金属零件的激光净成形制造。

2 实 验

激光净成形实验在自行搭建的激光加工系统上进行。该系统由 2 kW 连续波 CO₂ 激光器(STS 2001, PRC)、多坐标数控机床和送粉系统组成,如图 1 所示。实验所使用的粉末材料为 IN718(-170~

+325 目)、Rene 80(-140~+325 目)和 Rene 195 (-140~+325 目),基底材料为不锈钢。

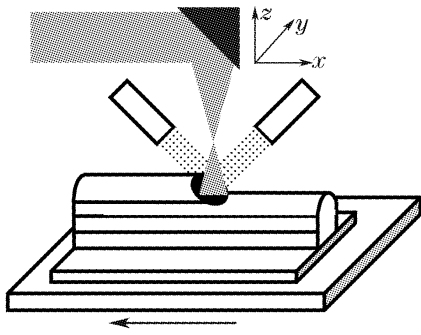


图 1 激光净成形系统示意图
Fig. 1 Sketch for LNSM system

表 1 工艺参数范围

Table 1 Processing parameters

Laser power P /W	180~400
Scanning speed V /(mm/min)	150~350
Powder feed rate F /(g/min)	1.5~4.0
Defocus length D /mm	+5~+15
Shielding gas flow rate S /(l/min)	5~200

表 2 实验设计表

Table 2 DoE table with coded processing parameters

Laser power	Scanning velocity	Powder feeding rate	Defocus length	Shielding gas flow rate
-1	-1	-1	-1	1
-1	1	-1	-1	-1
-1	-1	1	-1	-1
-1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1
0	0	0	0	0
1	-1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1
1	-1	1	1	-1
-1	1	-1	1	1
-1	1	1	1	-1
1	1	-1	1	-1
1	1	-1	-1	1
1	-1	-1	1	1
-1	1	1	-1	1
1	1	1	-1	-1
-1	-1	1	1	1

为研究工艺参数对成形的影响,采用了 5 参数、2 水平的实验设计,所选择的参数包括:激光功率、扫描速度、送粉量、光斑大小(离焦量)、保护气体流量,所考察的参数为堆积厚度。表 1 列出了实验所选择的参数范围,表 2 列出了参数经过归一化处理后的实验设计表格。采用每一组参数在不锈钢基底上单方向堆积 40 层,通过测量后二十层的尺寸获得

该工艺条件下的堆积厚度,再通过回归分析获得堆积厚度的传递函数。

为了能够准确获得最大堆积厚度的信息,在实验过程中采用了闭环控制系统实时监测并调控每层的堆积厚度和抬升量^[9],如图 2 所示。通过 CCD 相机获得熔池的高度信息,再通过计算机控制数控系统实时调整每层的抬升量,保证了每层的实际堆积厚度与抬升量的一致。

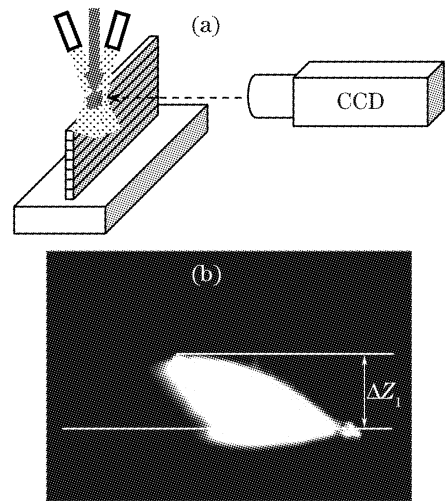


图 2 实时监控示意图(a)及其拍摄的熔池图像(b)
Fig. 2 Online monitoring system (a) and melting pool image (b)

3 分析与讨论

通过对成形过程进行实时监测发现,激光净成形制造过程中,根据不同的实际堆积厚度和预设堆积厚度(即抬升量)的大小关系,粉末交汇点与熔池的相对位置会出现三种情况:

- 1) 粉末的交汇点恰好在熔池的位置[图 3(a)];
- 2) 粉末的交汇点在熔池的上方[图 3(b)];
- 3) 粉末的交汇点在熔池的下方[图 3(c)]。

第一种情况发生在抬升高度与堆积厚度相等时,大多数粉末直接进入熔池,由于只有进入熔池的

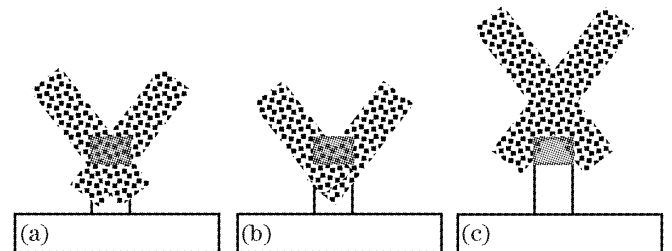


图 3 粉末流与熔池位置关系。(a)在熔池的位置;
(b)在熔池的上方;(c)在熔池的下方

Fig. 3 Position of powder stream and melting pool. (a) at melting pool; (b) above melting pool; (c) below melting pool

粉末才能堆积下来^[10~14],因此得到的堆积厚度最大,粉末的利用率也最高,见图4(a)。如果粉末流的状态非常平稳,那么成形过程将稳定地进行下去;

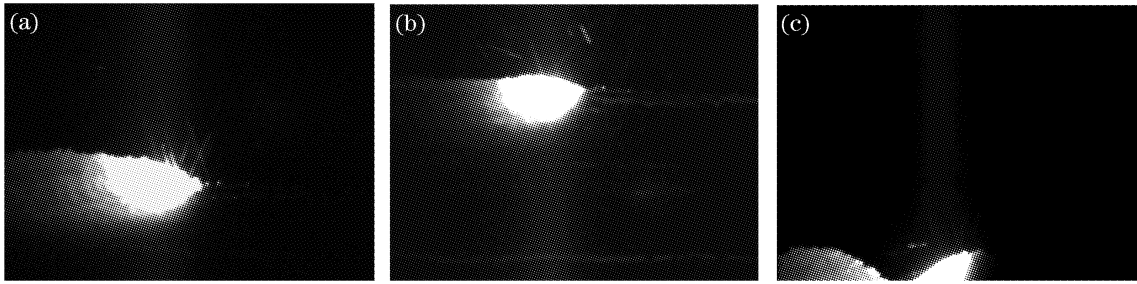


图4 不同粉末汇聚点下的熔池照片。(a)在熔池的位置;(b)在熔池的上方;(c)在熔池的下方

Fig. 4 Melting pool with different powder joint point. (a) at melting pool; (b) above melting pool; (c) below melting pool

第二种情况发生在抬升高度小于堆积厚度时,仅有处于粉末流中上部的一部分粉末进入熔池,下部的粉末将与已经凝固的固态部分相碰而被弹走。当粉末流突然变小,实际的堆积厚度减小,熔池向下方靠近,原先没有进入熔池的粉末就进入熔池,弥补了粉末流减小的影响;而当粉末流突然增大时,熔池向上方靠近,进入熔池的粉末比例进一步减小,使得实际的堆积厚度仍然保持在一个稳定的状态。可见,即使此时粉末的流动出现一定程度的波动,进入熔池的粉末数量也不会有大的变化,也就是说堆积厚度能够保持稳定,见图4(b)。但有相当一部分粉末没有被有效地利用,这是一种牺牲粉末利用率而使成形过程保持稳定的方式。

第三种情况发生在抬升高度大于堆积厚度的情况,此时仅有粉末流底部的一些粉末进入熔池,实际堆积厚度很小,因此两者之间存在一个差值。随着堆积层数的增加,粉末交汇点与熔池之间的距离越来越远,能够进入熔池的粉末也越来越少,实际堆积厚度越来越小,设定堆积厚度和实际堆积厚度之间的差距越来越大,成形过程无法稳定地进行。即使此时粉末流出现微小的差异,也将导致成形表面出现明显的波浪状起伏。而且随着堆积层数的增加,波浪状起伏将逐渐被放大。最终,由于没有粉末进入熔池中导致成形过程无法进行,见图4(c)。

通过分析可以看出,要想使成形过程保持稳定地进行,除了要保证粉末流的连续稳定之外,很重要的一点就是要控制抬升高度不能大于实际的堆积厚度,否则就容易出现成形过程不稳定甚至完全失败的结果。较为稳妥的做法就是将抬升高度设置为略小于实际的堆积厚度。而如何得到不同工艺条件下的实际堆积厚度的最大值就成为设置工艺参数的一个很有价值的参考。通常情况下,可以通过逐渐调整抬

而一旦粉末的流动出现波动,那么实际的堆积厚度的变化所导致的粉末流与熔池的相对位置的变化将对成形过程的稳定性发生影响,比如出现表面起伏。

升量的办法得到一组工艺条件下的最大堆积厚度,但要想获得准确的数值往往需要大量的实验,费时费力。因此,本文设计了系统的实验,并通过采用闭环控制系统实时调整抬升量,使抬升高度与实际堆积厚度保持一致,确保了每一层的堆积厚度都是最大堆积厚度。再通过对实验结果的分析获得最大堆积厚度的传递函数,即可用该函数对其他工艺条件下的最大堆积厚度进行预测以指导工艺参数的选择。

通过对实验结果的回归分析,得到了三种材料的最大堆积厚度传递函数(归一化参数)。

$$H_{IN718} = 0.52 + 0.043P - 0.096V + 0.094M - 0.008313S - 0.022MS, \quad (1)$$

判定系数为0.9748,调整判定系数为0.9623。

$$H_{Rene80} = 0.44 + 0.016P - 0.079V + 0.13M - 0.015D - 0.017VM, \quad (2)$$

判定系数为0.9957,调整判定系数为0.9935。

$$H_{Rene195} = 0.47 + 0.026P - 0.094V + 0.15M + 0.013D + 0.012PM - 0.021VM, \quad (3)$$

判定系数为0.9941,调整判定系数为0.9902。

其中 P 为激光功率, V 为扫描速度, M 为送粉量, D 为离焦量, S 为保护气体流量,判定系数和调整判定系数表示回归方程的拟合程度,该值越接近1,表示拟合程度越好。

图5列出了工艺参数对三种材料最大堆积厚度的影响关系[(a),(b)为IN718,(c),(d)为Rene80,(e),(f)为Rene195]。从(1)式~(3)式和图5中可以看出,对于堆积厚度影响最大的工艺参数是扫描速度、送粉量和激光功率。最大堆积厚度随激光功率和送粉量的增大而增大,随扫描速度的增大而减小。这主要是由于扫描速度的减小和送粉量的增大直接导致进入熔池的粉末量增加,因而增大了堆积厚度。而激光功率的提高将增大熔池的尺寸,从而

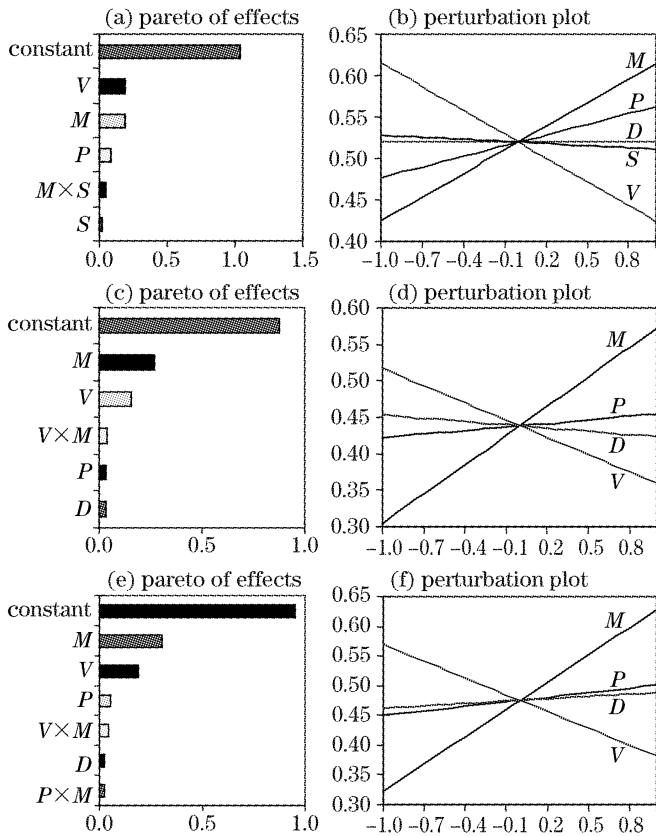


图 5 主次因素排列表和参数影响关系图

Fig. 5 Pareto of effects and perturbation of processing parameters. (a), (b) IN718; (c), (d) Rene80, (e), (f) Rene195

能使更多的粉末有机会进入熔池。

通过这些材料的传递函数,不同工艺条件下的最大堆积厚度就可以计算出来,将抬升量设置为略小于最大堆积厚度即可以保持成形过程稳定的进行。图 6 为参考传递函数设置工艺参数后得到的成形零件,可以看出零件具有很好的外形和表面质量。

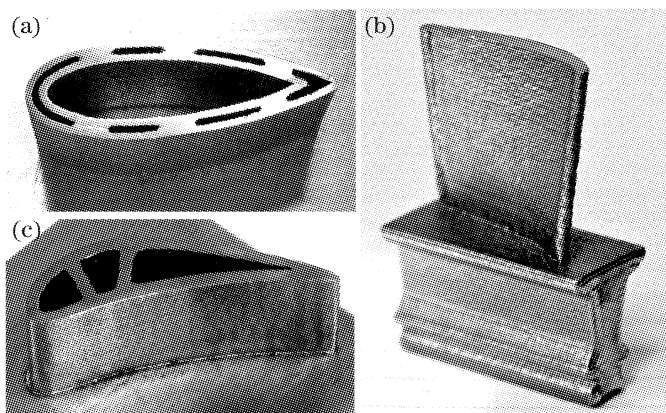


图 6 成形零件

Fig. 6 LNSM samples

4 结 论

1) 激光净成形过程的稳定性主要由抬升量和实际堆积厚度的关系决定,只有当抬升量小于实际堆积

厚度的情况下成形过程才能保持连续而稳定地进行。

2) 通过计算和分析成形过程的传递函数发现,激光功率,扫描速度和送粉量是影响激光净成形的主要工艺参数。

参 考 文 献

- Li Yanmin, Peng Zhixue, Liu Yong. Laser Net Shape Manufacturing of Metallic components [C]. 7th China National Conference on Laser Material Processing, Laser Processing Committee of China Optical Society, 2004
- 李延民,彭志学,刘 勇. 激光净成形制造金属零件 [C]. 第七届全国激光加工学术会议论文集,中国光学学会激光加工专业委员会,2004
- D. M. Keicher, J. E. Smugeresky, J. A. Romero *et al.*. Using the laser engineered net shaping (LENS) process to produce complex components from a CAD solid model [C]. *SPIE*, 1997, **2293**: 91~97
- Eric Schlienger, Duane Dimos, Michelle Griffith *et al.*. Near net shape production of metal components using LENS [C]. Proceedings of the Third Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, Vol. 1, Honolulu, Hawaii, USA, July 12~16, 1998. 1581~1586
- Lewis G K, Nemeck R B, Milewski J O *et al.*. Directed light fabrication [C]. Proceedings of the ICALEO '94. Laser Institute of America, Orlando, Florida, 1994. 17~21
- J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi *et al.*. Closed loop direct metal deposition; art to part [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **34**(4~6): 397~414
- Lijue Xue, Andre Theriault, Mahmud-Ul Islam *et al.*. Laser consolidation of TI-6AL-4V alloy to build functional net-shape airfoils with embedded cooling channels [C]. Proceedings of the ICALEO '04. Laser Institute of America, San Francisco, 2004. 1706A. D
- Yanmin Li, Xiaoping Huang, Yong Liu *et al.*. Laser net shape manufacturing of metallic materials with CO₂ and fiber laser [C]. Proceedings of the ICALEO '05. Laser Institute of America, Miami, 2005. 320~325
- Huan Qi, Magdi Azer, John Deaton. Development of transfer functions for controlling fabrication of components by laser net shape deposition (LNSM) [C]. Proceedings of the ICALEO '05. Laser Institute of America, Miami, 2005. 869~877
- Guo-Shuang Cai, Bing-Ran Zuo, Robert W Tait *et al.*. Vision-based dual feedback control of deposition height for laser consolidation [C]. Proceedings of the ICALEO '05, Laser Institute of America, Miami, 2005. 856~861
- Jehnming Lin. A simple model of powder catchment in coaxial laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(3): 233~238
- C. L. Atwood, M. L. Griffith, L. D. Harwell *et al.*. Laser spray fabrication for net-shape rapid product realization LDRD [D]. Sandia Report, 1999
- Yoshimi Kizaki, Hirozumi Azuma, Satoshi Yamazaki *et al.*. Phenomenological studies in laser cladding. Part I. time-resolved measurements of the absorptivity of metal powder [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, **32**(1A): 205~212
- Yoshimi Kizaki, Hirozumi Azuma, Satoshi Yamazaki *et al.*. Phenomenological studies in laser cladding. Part II. Thermometrical experiments on the melt pool [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, **32**(1A): 213~220
- Jehnming Lin. Temperature analysis of the powder streams in coaxial laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(8): 565~570