

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0180-05

Nd:YAG 激光熔覆快速制造技术研究

卢尧君, 陈光霞, 胡乾午, 曾晓雁

(华中科技大学激光加工国家工程研究中心, 武汉光电国家实验室(筹)激光部, 湖北 武汉 430074)

摘要 报道了 Nd:YAG 全固态激光器同轴送粉激光熔覆快速制造金属零件的工艺与机制。主要研究了不同工艺条件下, 激光熔覆工艺参数(激光功率、扫描速度、送粉量大小)对激光熔覆层宽度、高度、表面平整度和成型质量的影响规律。在此基础上, 对成型薄壁墙的水平方向倾斜角度在不同功率下做了极限实验并分析了其中原因, 找出了最佳的成型参数。最后, 将 Nd:YAG 激光熔覆快速制造所制备零件的质量与 CO₂ 激光熔覆所制备的进行了对比, 结果表明, 采用 Nd:YAG 激光器制备的金属试样结合强度更高, 同时, 两者都高于相近成分下常规加工方式所加工试样的相应值, 且均表现为韧性断裂。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 激光直接制造; Nd:YAG 激光; 力学性能; 不锈钢

中图分类号 TG665 **文献标识码** A

Research of Direct Laser Fabrication of Metallic Materials by Nd:YAG Laser

LU Yaojun, CHEN Guangxia, HU Qianwu, ZENG Xiaoyan

(Wuhan National Laboratory of Optoelectronics, National Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Direct laser fabrication (DLF) of metallic materials has been carried out by Nd:YAG all-solid-state laser. The effect of the processing parameters, such as laser power, scanning velocity, and power feeding rate on the final deposition result was investigated. The utmost offset of deposited wall in horizontal orientation was also studied. A mechanical performance comparison of samples made by Nd:YAG laser and CO₂ laser was also presented. It was found that the metallic parts made by Nd:YAG laser got well strength than CO₂, but both fracture strength are higher than the corresponding values got by the conventional processing methods, as well as they all exhibits as toughness fracture.

Key words laser technique; laser cladding; direct laser fabrication; Nd:YAG laser; mechanical property; stainless steel

1 引 言

激光直接制造(DLF)技术, 是 20 世纪 90 年代中后期发展起来的一种先进制造技术。它将快速成型(Rapid prototyping, RP)技术与激光熔覆技术相结合, 采用激光作为热源, 以预置或同步供给的金属粉末(丝)为材料, 在金属基板上逐层堆积, 无需借助刀具和模具就能从 CAD 文件直接制造出各种复杂的近净形致密金属零件, 具有零件性能好、制造柔性高、生产周期短、成本较低等优点, 受到了学术界和制造业的广泛关注^[1~3]。

目前, 对激光快速成型具有实际使用功能的致

密金属零件的研究, 已引起广泛的关注, 许多发达国家正大力开发该技术, 并取得了显著成果。Wu Xinhua 等^[4,5]对 Ti 合金的 DLF 工艺进行了研究, 制件的机械性能在 HIP 处理之后与锻件性能相当。张永忠等人对激光快速成型 316L 不锈钢薄壁墙的力学性能进行了研究, 认为拉伸试样为韧性断裂, 力学性能与铸造退火态相当^[6]。姬生钦等研究了不同路径填充模式下用 DLF 工艺所制备的金属零件, 认为不同填充模式对其组织和性能有着一定影响^[7]。但是以上的研究都是采用的 CO₂ 激光器, 而将 Nd:YAG 全固态激光器用于快速成型的研究还罕

作者简介: 卢尧君(1980—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光先进制造技术的研究。E-mail: yaojunlu@tom.com

导师简介: 曾晓雁(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造技术与设备方面的研究。

E-mail: xyzeng@mail.hust.edu.cn

见报道。

本文着重研究了利用 Nd:YAG 激光器进行激光熔覆工艺参数(激光功率、扫描速度、送粉量大小等)对激光熔覆层的影响规律,并对成型薄壁墙的水平方向倾斜角度在不同功率下做了极限实验,最后将 Nd:YAG 激光熔覆快速制造所制备的零件质量与 CO₂ 激光熔覆所制备的进行了对比。

2 实验设备、材料及方法

DLF 工艺的基本工作原理为,先借助 CAD 软件或反求技术生成零件的 CAD 模型,再利用成型控制软件将 CAD 模型按一定间距切割成一系列平行薄片,然后根据薄片轮廓设计出合理的激光扫描轨迹,并转换成 CNC 工作台的运动指令。激光束在指令控制下扫描基板并将送料器(送粉器或送丝机)输送的金属原料用激光熔覆的方法沉积出与切片厚度一致的一层薄片。上述过程完成后,聚焦镜、粉末喷嘴等整体上升一定高度并重复上述过程,沉积下一层薄片,如此逐层堆积直至形成具有所需形状的三维实体金属零件。

实验采用的激光直接制造系统如图 1 所示。采用 Rofin 公司生产的 Nd:YAG 1.1 kW 二极管抽运全固态激光器,焦点激光束直径 1.0 mm。采用我校研制的 HUST-II 型自动送粉器,通过配套的四轴同轴送粉头进行送粉,将合金金属粉末输送至成型零件上。基体材料为 10 mm 厚 A3 钢板,合金粉末为不锈钢,其质量分数 ω 为 Fe-17Cr-4Ni-2Mo-0.1C,粉末粒度为 -150/+360 目。实验前在烘干炉中烘干并冷却,以去除粉末中的水分,提高粉末的流动性和成型质量。送粉载气为 N₂,流量为 6 L/min。

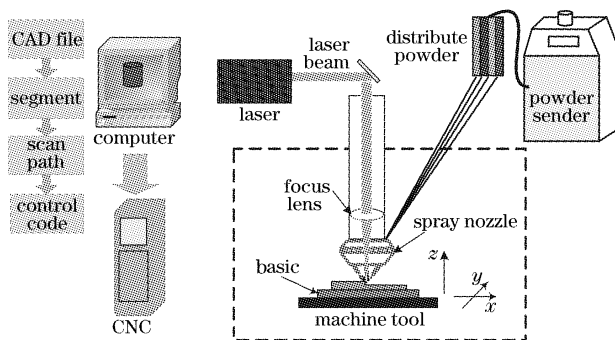


图 1 激光直接制造系统示意图

Fig. 1 System of direct laser fabrication

为了研究薄壁墙在水平方向倾斜的极限值,使其每一层在 x 轴方向产生一个偏移量。最后将制备的金属拉伸试样在 Zwick/Roell 050 型拉伸机上进行拉伸性能测试,并与 CO₂ 激光器制得的相同材料的拉

伸试样进行比较。

3 实验结果

3.1 工艺参数对线宽和线高的影响规律

3.1.1 激光功率对扫描线宽和线高的影响

采用扫描速度为 900 mm/min,只沉积一层。图 2 为激光功率对扫描线宽和线高的影响。可以看出,随激光功率的提高,熔覆层的宽度和高度也增大。当激光功率大于 600 W 时,受激光光斑大小的限制,熔覆层的最大宽度已不再增加。激光功率大于 400 W 时,由于过高的激光功率,因受到输送金属粉末的限制熔化量不再增加,反而会造成一部分熔覆层的温度进一步提高,流动性也大幅度提高,因此使熔覆层高度有所下降。

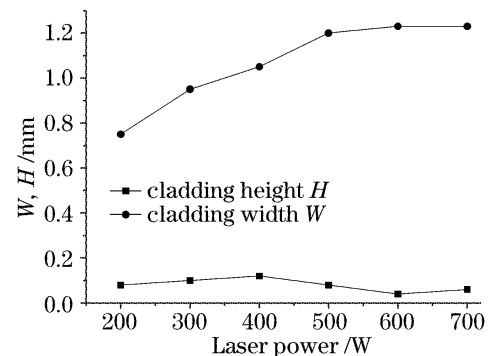


图 2 激光功率对扫描线宽和线高的影响

Fig. 2 Influence of laser power on cladding width and height

3.1.2 扫描速度对扫描线宽和线高的影响

采用激光功率为 400 W,只沉积一层。图 3 为扫描速度对扫描线宽和线高的影响。可以看出,随扫描速度的增加,不但使得合金粉末的输入量降低,而且使得输入到基体或预成型工件能量的减少,使粉末利用率降低,从而使熔化区域和成型宽度减小,高度也随之降低。当激光扫描速度过大,激光束注

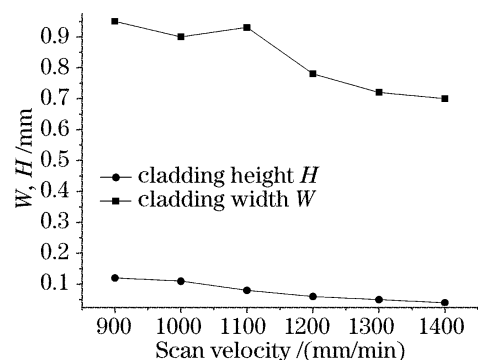


图 3 扫描速度对扫描线宽和线高的影响

Fig. 3 Influence of scan velocity on cladding width and height

入到基材表面的能量不够,使得熔池温度与金属粉末的熔点相近或稍低时,大量的金属粉末在到达基体或预置工件表面后,将穿过激光作用区远离工件,导致沉积层的高度显著降低。这充分说明了当扫描速度增大时,出现沉积层高度不断下降的原因。

3.1.3 送粉速率对扫描线宽和线高的影响

采用激光功率为 400 W,扫描速度 900 mm/min, z 轴增量为 0.2 mm,共沉积十层。图 4 为送粉速率对扫描线宽和线高的影响。可以看出,在一定的范围内,当送粉速率较小时,成型高度受送粉速率的变化影响很大,而当送粉速率大于 5 g/min 时,成型高度随扫描速度的增加略有增加,但基本趋于稳定;相对于成型高度的变化,宽度随送粉速率的增加逐渐增大。这是因为在激光功率足够大的情况下,送粉量的增加导致熔化金属粉末的增加,从而增大了熔池尺寸,在最终的凝固过程中,成型高度和宽度都会相应增加。但当送粉量超过某激光功率所能熔化的最大金属粉末量时,增加的金属粉末不能熔化而成型,相反会造成更多的金属粉末在高温下黏结在成型零件的表面,影响成型精度和后续的制造过程。

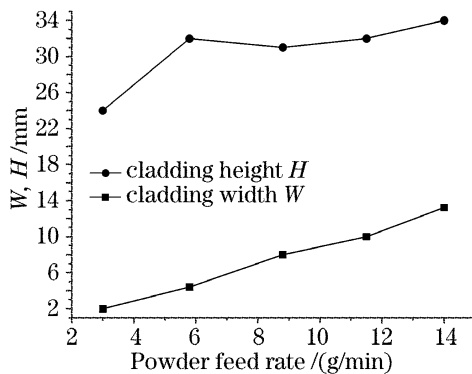


图 4 送粉速率对扫描线宽和线高的影响

Fig. 4 Influence of powder feed rate on cladding width and height

3.2 工艺参数对成型质量的影响规律

3.2.1 激光功率对成型质量的影响

激光功率对成型质量有着重要的影响,图 5 给出了不同激光功率下制造零件的宏观照片,零件表面利用砂轮进行磨光,以便观察成型质量。

适当增大激光功率可以增加成型高度,同时金属粉末能够充分熔化,使成型的致密度增加,获得良好的机械性能。但面粗糙度增加,会造成金属粉末中部分元素的烧损、气化,使最终工件组织、合金成分等与设计不符。此外,过高的温度会增大氧化倾向。而过低的激光功率会造成新的问题,因为热输入量的降低,不仅使粉末熔化量减少,成型效率降

低,而且可能导致粉末不能充分熔化,和熔覆层搭接处不能达到充分的冶金结合,形成沿扫描方向的欠结合条形区域带[如图 5(b),(c)所示],甚至形成夹渣现象,所形成的缺陷将导致零件过早失效,影响其使用寿命和可靠性。

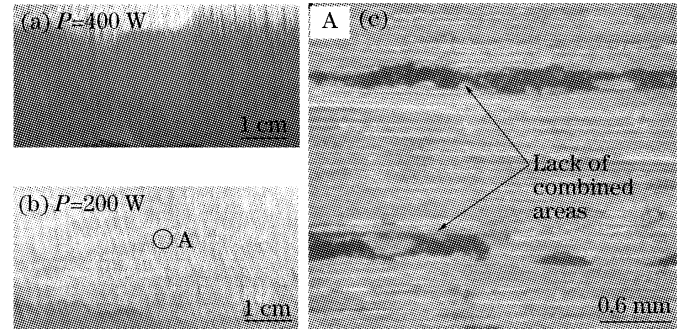


图 5 激光功率对成型质量的影响

Fig. 5 Influence of laser power on deposition quality

3.2.2 z 轴进给量和扫描速度对成型质量的影响

为了保证激光直接制造过程中零件的稳定增长,获得稳定的成型过程,粉末喷嘴与成型工件间的垂直距离应恒定,这取决于送粉速率、 z 轴进给量和扫描速度及激光功率的大小。在理想状态下,为保持成型精度, z 轴进给量应当等于分层高度,同时还应当等于每层熔化金属粉末的成型高度。激光扫描速度的不同又直接影响金属粉末的熔化量,这些参数相互作用是一个相当复杂的过程。在送粉速率和激光功率一定的情况下,通过正交实验得出激光最佳扫描速度随 z 轴进给量的不同而改变,其对应值如表 1 所示。可以看出 z 轴增量越大,扫描速度越小,这与所需熔化更多的金属粉末补给 z 轴增量有关,速度的降低有利于更多的金属粉末输送到熔池内,同时增加激光对熔池的照射时间,增大能量的输入,从而增大熔化金属的成型高度。

表 1 z 轴增量与最佳扫描速度对应关系

Table 1 Corresponding scan velocity to increment of z -axis

z -increment / mm	0.1	0.2	0.3	0.5
Scan speed / (mm/min)	>800	600	400	275

3.3 薄壁墙沿水平方向偏移极限实验及分析

采用 300 W 和 500 W 两种激光功率来做实验。因为功率过小将使得送粉头输送的粉末不能足量熔覆在基底上,偏移量很小;功率过大则会使加工过程中薄壁墙温度过高,由于不能及时冷却而使得墙体软化无法堆高。

采用激光功率为 300 W,扫描速度 900 mm/min,

沉积 100 层, z 轴升量为 0.1 mm, 分别作了以下四组实验, 每组的每层偏移量不同, 如图 6 所示。每层从左至右偏移量依次为 0, 0.01 mm, 0.02 mm, 0.03 mm。可见当偏移量达到 0.03 mm 时, 薄壁墙表面已经呈锯齿状。这是由于偏移量过大, 和上一层的搭接率太小, 使得底部没有足够的支撑力而使其不能凝固在其正上方; 另外粉末不能准确聚焦在光斑焦点处, 进入熔池的粉末不平均, 因而沉积的高度和宽度呈现多样化, 如此每层堆积下去, 使得缺陷越来越严重, 最后致使表面出现锯齿状。

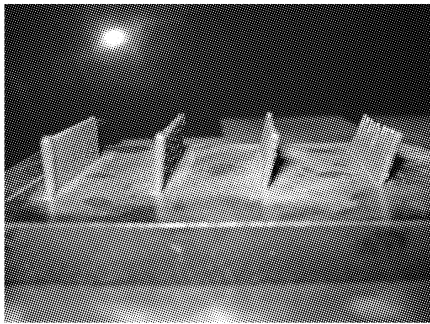


图 6 300 W 功率下极限偏移实验图

Fig. 6 Utmost offset of deposited wall with 300 W power

采用激光功率为 500 W, 扫描速度 900 mm/min, 沉积 100 层, z 轴升量为 0.1 mm, 分别作了每层偏移量依次为 0, 0.01 mm, 0.02 mm, 0.03 mm, 0.04 mm, 0.05 mm, 0.06 mm, 0.07 mm, 0.08 mm 九组实验。图 7 所示从左至右依次为 0.07 mm, 0.08 mm 为偏移量的侧面成型图以及它们的正面视图。可以发现, 当每层偏移量增加到 0.08 mm 时, 薄壁墙出现裂缝。对比上面的实验, 由于功率提高了 200 W, 熔池温度更高, 使得进入熔池的粉末能更多地充分熔化, 熔宽加大, 从而与上一层的搭接率增大, 因此 500 W 的极限偏移量较 300 W 的要大一些。图 8 为制作的弧形薄壁墙实物图, 采用功率为 500 W, 扫描速度为 900 mm/min, 沉积 100 层, z 轴升量为 0.1 mm, 每层偏移量为 0.07 mm。

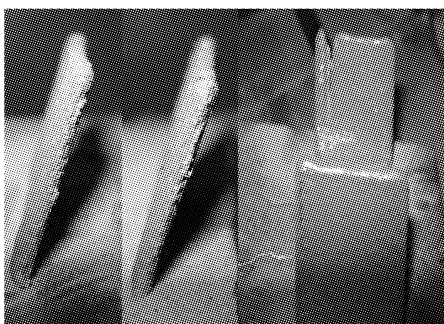


图 7 500 W 功率下的极限偏移实验图

Fig. 7 Utmost offset of deposited wall with 500 W power

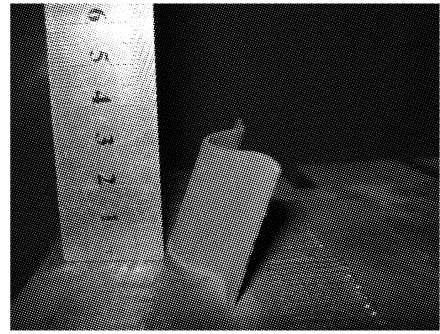


图 8 弧形薄壁墙实物图

Fig. 8 Arc thin wall fabricated directly by laser cladding

3.4 制作拉伸试样并与 CO₂ 制作的试样进行比较

采用激光功率为 500 W, 扫描速度 1100 mm/min, 搭接率为 33%, 送粉量为 6.8 g/min, 送粉载气 N₂, 流量为 13.5 L/min 制作拉伸试样, 如图 9 所示。经线切割加工和表面磨光制成满足 GB6397-86 规定的片状金属拉伸试样。在 Zwick/Roell 050 型拉伸试验机上进行拉伸性能测试。

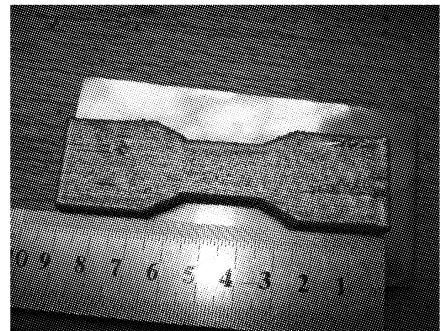


图 9 不锈钢拉伸试样实物图

Fig. 9 Tensile sample fabricated directly by laser cladding

将本实验与姬生钦等采用 5 kW 纵流 CO₂ 激光器做出的相同材料拉伸试样作横向比较。姬生钦等采用的激光功率为 650 W, 激光束光斑直径为 0.9 mm, 扫描速度为 600 mm/min, 搭接率为 33%, 送粉量为 6 g/min, 送粉载气为 Ar, 流量为 10 L/min, 采用硬光路传输。本实验激光器用光纤传导, 输出波长为 1.06 μm, 比 CO₂ 激光波长 10.6 μm 小一个数量级, 因而与金属的耦合效率更高、加工性能更好。考虑到 CO₂ 激光器具有更好的光束质量和较高的能量转换效率, 综合各方面因素, 两激光器的实验参数基本一致, 具有可比性, 将两者数据列于表 2。表 3 为与本实验条件下相近合金成分的抗拉强度。

从表 2 和表 3 中可看出, 采用 Nd:YAG 激光器制作的拉伸试样的抗拉强度更高, 但两者都高于相近成分下常规加工方式所加工试样的相应值, 且均表现为韧性断裂。由于 Nd:YAG 激光器的光束的方向性和单色性没有 CO₂ 激光器的好, 光斑直径较

大,且本实验是在大气环境下进行,熔覆层表面形成大量的氧化皮和氧化渣,在搭接和进行下一层堆积时,这些氧化物未能充分熔化而残留于零件内部,因而制得的试样缺陷较多,延伸率远小于 CO₂ 激光器所制得的试样。

表 2 两种激光器熔覆不锈钢拉伸试样机械性能的比较

Table 2 Comparison of mechanical properties of laser cladding stainless steel with two kind laser

Kind of laser machine	σ_{UTS}/MPa	$\delta / \%$
Nd:YAG	982	8.27
CO ₂	771	60.8

表 3 常规方法制作的不锈钢拉伸试样的机械性能

Table 3 Mechanical properties of stainless steel with the conventional processing methods

Condition	σ_{UTS}/MPa	$\delta / \%$
Cast 316L (CF-3M)	552	55
Hot finished and annealed 316L bar	480	40
Cold finished and annealed 316L bar	620	30

4 结 论

在一定范围内,激光功率与扫描速度对单道熔覆轨迹的作用相反,与送粉率的作用相同。

适当提高激光功率,增大功率密度,可以提高熔覆层的结合质量;为保证成型的稳定性,应选取扫描速度和 z 轴增量的最佳匹配值进行零件的制造。

影响薄壁墙在水平方向每层的极限偏移量的因素主要与采用的激光功率有关。适当提高激光功率

以及送粉系统的精度能适当提高其偏移值。

采用 Nd:YAG 激光器制备的金属试样结合强度较高,而采用 CO₂ 激光器制备的试样则断裂强度较低,但两者都高于相近成分下常规加工方式所加工试样的相应值,且均表现为韧性断裂。

参 考 文 献

- 1 P. A. Kobryn, S. L. Semiatin. Microstructure and texture evolution during solidification processing of Ti-6Al-4V. *J. Materials Processing Technology*, 2003, **135**(2~3): 330~339
- 2 Zhong Minlin, Ning Guoqing, Liu Wenjin. Research and development on laser direct manufacturing metallic components [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(5): 388~391
钟敏霖,宁国庆,刘文今. 激光熔覆快速制造金属零件研究与发展 [J]. 激光技术, 2002, **26**(5): 388~391
- 3 Zhang Yongzhong, Shi Likai, Zhang Pingzhi *et al.*. The newest advance in laser rapid forming of metallic powder [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, **29**(6): 361~365
张永忠,石力开,章萍芝等. 基于金属粉末的激光快速成型技术新进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2000, **29**(6): 361~365
- 4 Xinhua Wu, Jing Liang, Junfa Mei *et al.*. Microstructures of laser deposited Ti-6Al-4V [J]. *Materials and Design*, 2004, **25**(2): 137~144
- 5 X. Wu, R. Sharman, J. F. Mei *et al.*. Direct laser fabrication and micro-structure of a burn-resistant Ti alloy [J]. *Materials and Design*, 2002, **23**(3): 239~247
- 6 Zhang Yongzhong, Xi Mingzhe, Shi Likai *et al.*. Research on laser direct deposition of 316L stainless steel [J]. *J. Materials Engineering*, 2002, (5): 22~25
张永忠,席明哲,石力开等. 激光快速成形 316L 不锈钢研究 [J]. 材料工程, 2002, (5): 22~25
- 7 Ji Shengqin, Li Peng, Zeng Xiaoyan. Microstructure and mechanical property analyses of the metal parts direct fabricated by laser cladding [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(2): 130~132
姬生钦,李 鹏,曾晓雁. 激光熔覆直接制造金属零件的组织及力学性能分析 [J]. 激光技术, 2006, **30**(2): 130~132