

激光立体成形技术中工艺参数的数值模拟分析

魏 勇¹, 邓听之¹, 周淑怡¹, 陈 缘¹, 陶家友¹, 周武军²

(1. 湖南理工学院 物理与电子科学学院, 湖南 岳阳 414006; 2. 岳阳大陆激光技术有限公司, 湖南 岳阳 414006)

摘 要: 激光立体成形是一种非常复杂的热力学耦合过程, 影响成形过程的因素很多. 本文在对激光立体成形技术国内外发展研究现状进行概述的基础上, 通过对同步送粉激光熔覆技术原理的分析建立了热力学模型, 并针对 10.6 μm 的 CO_2 激光器加热熔覆不锈钢材料 3Cr13 进行了工艺参数的数值模拟分析. 结果表明光斑直径越大能量密度越低, 光斑直径越小能量密度越高; 同一功率下, 扫描速度越大, 单道熔覆宽度越小; 扫描速度相同, 功率越大, 单道熔覆宽度也越大.

关键词: 激光立体成形; 激光熔覆; 工艺参数; 模拟分析

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-5298(2019)02-0049-04

Numerical Simulation Analysis of Technological Parameters in Laser Stereo Forming Technology

WEI Yong¹, DENG Tingzhi¹, ZHOU Shuyi¹, CHEN Yuan¹,
TAO Jiayou¹, ZHOU Wujun²

(1. College of Physics and Electronics, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China;

2. Yueyang Continental Laser Technology Co., Ltd., Yueyang 414006, China)

Abstract: Laser solid forming is a very complicated thermodynamic coupling process, and there are many factors affecting the forming process. On the basis of summarizing the development and research status of laser solid forming technology at home and abroad, a thermodynamic model was established by analyzing the principle of synchronous powder feeding laser cladding technology, and numerical simulation analysis of process parameters was carried out for 10.6 μm CO_2 laser heating cladding stainless steel 3Cr13. The results show that the larger the spot diameter, the lower the energy density, and the smaller the spot diameter, the higher the energy density. At the same power, the larger the scanning speed, the smaller the single cladding width; At the same scanning speed, the greater the power, the greater the width of single cladding.

Key words: laser solid forming; laser cladding; process parameters; simulation analysis

激光立体成形技术(Laser Solid Forming, LSF)是基于同步送粉激光熔覆的先进增材制造技术^[1], 具有无模具、低成本、高性能以及周期短的特点, 为航天和航空的零件生产开辟了一条快速、高效的途径. 目前国内外有很多研究单位对这方面进行研究. 该技术通过激光熔化金属粉末, 几乎可以“打印”任何形状的产品, 其最大的特点是使用金属材料, “打印”的产品具有极高的力学性能, 能够满足多种用途^[2]. 本文对激光立体成形技术在国内外的发展研究现状进行了概述, 通过建立热力学模型, 对 10.6 μm 的 CO_2 激光器加热熔覆不锈钢材料 3Cr13 的几个工艺参数进行了数值模拟分析, 分析的结论能够为同步送粉激光熔覆技术的运用提供一定的参考.

1 激光立体成形技术的发展现状

1.1 国外现状

目前, 国外对激光立体成形技术的研究已较为成熟, 主要研究机构包括美国桑迪亚国家实验室、洛斯阿莫斯国家实验室、密歇根大学、GE 公司宾夕法尼亚州立大学和 AeroMet 公司研究组等. 其中, 桑迪亚国家实验室利用这项技术生产了大量激光立体成形的金属零件, 包括镍基高温合金(Inconel718, 625, 690), 不锈钢(304 和 316), 工具钢(H13), 钛合金(Ti-6Al-4V), 钨等; 所生产的金属部件不仅仅形状复杂,

收稿日期: 2019-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(21427801); 湖南省教育厅优秀青年项目(17B112); 2018 年度湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划项目(湘教通[2018]255 号, 项目序号: 715)

作者简介: 魏 勇(1977-), 男, 湖南岳阳人, 博士, 高级工程师. 主要研究方向: 激光和非线性光学

而且与传统锻造技术制造的部件相比, 具有更为全面和出色的机械性能. 其中, F-22 战机上的 2 个全尺寸接头满足疲劳寿命两倍的要求, F/A-18E/F 的翼根悬挂环满足疲劳寿命四倍的要求, 着陆用的连杆满足飞行试验要求, 且寿命超出原技术要求的 30%^[2]. 激光三维成形加工的钛合金零件不仅具有优于传统工艺制造零件的性能, 而且由于材料节省和切削工艺优势, 使生产成本降低了 20%至 40%, 并将生产周期缩短了 80%^[4].

1.2 国内现状

相比国外, 国内激光立体成形技术的发展有些滞后. 直到 1995 年, 国内才提出了激光立体成形的技术构思, 并进行了前期探索性研究工作. 自 1997 年以来, 在航空科研基金和国家航空航天局重点项目的资助下, 西北工业大学国家缩合技术重点实验室和北京航空技术研究所高能量光束加工技术国防技术国家重点实验室系统性地进行了这方面的研究. 1998 年底, 建立了由 5kW CO₂ 激光器、四坐标数控工作台和送粉机组成的激光立体成形系统^[5]. 在接下来的几年里, 该系统在各个方面都得到了改进, 使其能够制造形状更为复杂的零件. 西北工业大学采用 LSF 技术修复的航空发动机零件如图 1 所示.

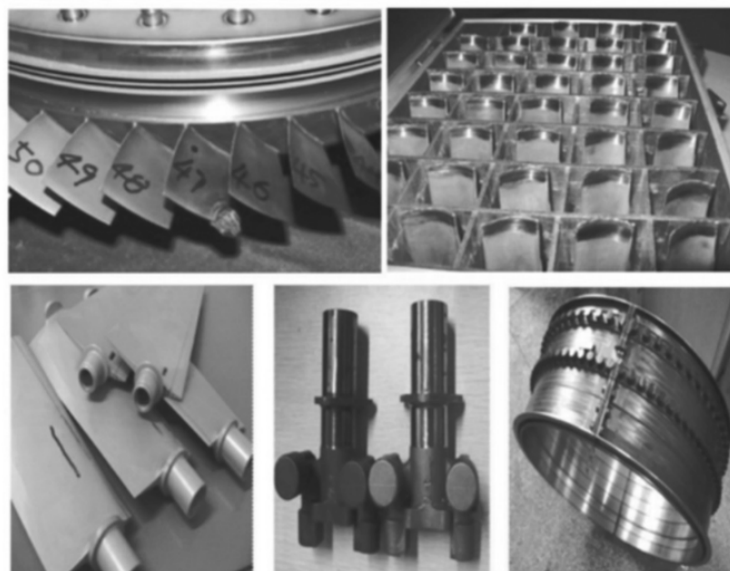


图 1 采用 LSF 技术修复的航空发动机零件图

在激光堆积成形大型钛合金方面, 北京航空航天大学的研究卓有成效, 其开发的飞机大型整体钛合金主承力结构件的激光快速成形工程化成套装备, 已成形出世界上最大的钛合金飞机主承力结构件, 并使我国成为世界上第二个掌握飞机钛合金大型结构件激光快速成形技术并实现装机应用的国家^[6].

作为新兴的技术, 其发展和应用离不开企业 and 政府的支持与推广. 2012 年 8 月 15 日, 中国第一台激光 3D 打印机由湖南华曙高科技有限公司研制成功. 与传统的打印技术相比, 激光 3D 打印产品的重量减轻了 65%, 节省了 90%的材料. 各大公司都已开始利用激光 3D 打印技术研发新产品, 从而提升自身在同行业中的竞争优势. 虽然国内激光 3D 打印技术与国外仍有很大差距, 但目前我国在激光 3D 打印技术方面的一些关键问题上已取得了突破, 激光 3D 打印产品也日渐走入人们的生活.

2 基本原理

2.1 激光立体成形技术原理

激光立体成形技术是在 20 世纪 90 年代初发展起来的. 该技术的基本原理是首先在计算机上生成零件的三维 CAD 实体模型, 然后按照一定的厚度切片并对模型进行分层^[4]. 将零件的三维形状信息转化为一系列二维轮廓信息, 然后在数控系统的控制下, 采用同步送粉激光熔覆的方法, 将给定的二维形状按照一定的填充路径逐点填充到一定的基体上^[7]. 并将该过程层层重复, 形成三维实体部分. 激光立体成形中最关键的两个形状参量是单层堆积厚度和单道熔覆宽度, 本文将针对单道熔覆宽度的一些工艺参数进行研究.

2.2 同步送粉激光熔覆技术

激光熔覆技术是指用不同的填料方法, 将选择性涂层材料放置在涂覆基体表面. 它与基体表面的薄层同时被激光照射熔化. 快速凝固后, 形成与基体材料极低稀释和冶金结合的表面涂层, 显著提高了基体

材料表面的耐热性、抗氧化性、耐磨性、耐蚀性和电气性。

同步送粉就是当激光扫描加热基体材料形成熔池时, 直接采用送粉装置将所需粉末送进熔池。也就是通过使用气载式的送粉器, 将激光熔覆的粉末直接输送到光斑内, 随着光斑在表面的移动, 形成了熔覆层。在同步送粉熔覆工艺参数中, 加工质量主要取决于加工速度、激光功率、焊点直径和送粉率等, 其中送粉率由送粉特性决定。

激光熔覆有3个重要的工艺参数: 激光功率、熔覆速度和光斑直径。激光功率 P 与熔覆速度 V 有相似的影响。熔覆速度过高时, 合金粉末不能完全融化, 没有达到优质熔覆的效果; 熔覆速度太低, 熔池存在时间太长, 粉末烧得太多, 合金元素损失, 同时基体的热输入量过大, 会增加变形量。

激光熔覆参数不是独立地影响熔覆层的宏观和微观质量, 而是相互作用相互影响。为了说明光斑直径 D 、激光功率 P 和熔覆速度 V 的综合作用, 提出了比能量 E_s 的概念:

$$E_s = \frac{P}{DV}, \quad (1)$$

即单位面积的辐照能量。通过比能量 E_s 可以把激光功率密度和熔覆速度等因素放在一起考虑。

比能量的降低有利于降低稀释率, 同时也与熔覆层的厚度有关。当激光功率恒定时, 熔覆层的稀释率随激光束直径的增大而减小, 当包层速度和激光光斑直径固定时, 稀释率随激光束功率的增加而增大。此外, 随着熔覆速度的增加, 基体的熔深减小, 基体材料对熔覆层的稀释率降低。单位时间内从熔池固-液边界向固体材料内部传递的热量为^[8]

$$R_m = \frac{AP}{2^{\frac{5}{2}} \rho c_p (T_m - T_0) \sqrt{Kv} [\operatorname{erfc}(1) - \frac{1}{e\sqrt{\pi}} + \frac{1}{\pi}]} \quad (2)$$

其中 R_m 为熔池半径; A 为物体对激光的吸收率; P 为激光功率; ρ 为密度; c_p 为热容; T_m 为熔池温度; T_0 为初始温度; K 为扩散系数; v 为扫描速度; erfc 为误差函数;

由文[9]可知, 在研究激光加热材料的过程中, 激光的能量密度可用平均能量密度来计算, 计算的结果为

$$\bar{q} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \frac{2rAQ}{\pi R^2} r \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) dr = \frac{0.865AQ}{\pi R^2}. \quad (3)$$

其中 \bar{q} 为平均能量密度; A 为物体对激光的吸收率; Q 为激光的能量; R 为光斑半径; r 为光斑中任意点到光斑中心的距离。

3 激光立体成形过程中的数值模拟

激光成形是一种非常复杂的热力学耦合过程, 影响成形过程的因素有很多, 如光斑大小、激光功率、扫描速度等等。材料性能参数对成形也有很大影响。本文主要分析了光斑直径和扫描速度对成形的影响。在使用 Matlab 进行仿真时, 选取不锈钢 3Cr13^[7]为材料, 通过 10.6 μm 的 CO_2 激光器对材料进行加热。在该仿真中, 使用的参数见表 1。

表 1 激光熔覆工艺参数仿真数值

工艺参数	取值
粉末密度	7.721g/m ³
初始温度	20 C
熔点	1440 C
激光吸收率	0.15
热扩散率	0.17
比热容	460 J/Kg·K
扫描速度	2,3,4m/s

3.1 激光功率与单道熔覆宽度的关系

单道熔覆宽度是激光立体成形技术中的一个重要参数, 而激光功率是影响单道熔覆宽度的主要参数之一。根据式(2)中单道熔覆宽度与激光功率的关系以及表 1 的数据, 当扫描速度分别为 2mm/s、3mm/s、4mm/s 时, 激光功率对应的单道熔覆宽度如图 2 所示。从图 2 可以看出, 当只考虑扫描速度与激光功率对单道熔覆宽度影响时, 在同一扫描速度下, 单道熔覆宽度随激光功率的增加而增大; 另外, 在同一激光功率下, 单道熔覆宽度随扫描速度的增大而减小。

3.2 单道熔覆宽度与扫描速度的关系

扫描速度也是影响单道熔覆宽度的一个主要参数. 根据式(2)中单道熔覆宽度与扫描速度的关系以及表 1 的数据, 当激光功率分别为 1000w、2000w、3000w 时, 扫描速度对应的单道熔覆宽度如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 在只考虑扫描速度与激光功率对单道熔覆宽度的影响时, 同一功率下, 扫描速度越快, 单道熔覆宽度越小; 扫描速度相同时, 功率越快, 单道熔覆宽度也越大.

3.3 激光能量密度与光斑直径的关系

当激光能量密度高时, 金属粉末不仅熔化得更加充分, 而且液化后的流动性更好, 可形成平整而连续的熔道^[10]. 根据式(3)中激光能量密度与光斑直径的关系以及表 1 的数据, 当激光能量分别为 150J、250J、350J 时, 光斑直径对应的激光能量密度如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 在只考虑光斑直径与激光能量对激光能量密度的影响时, 同一功率下, 光斑直径越大能量密度越低, 光斑直径越小能量密度越高; 在相同的光斑直径下, 激光能量密度随激光能量的增大而增大.

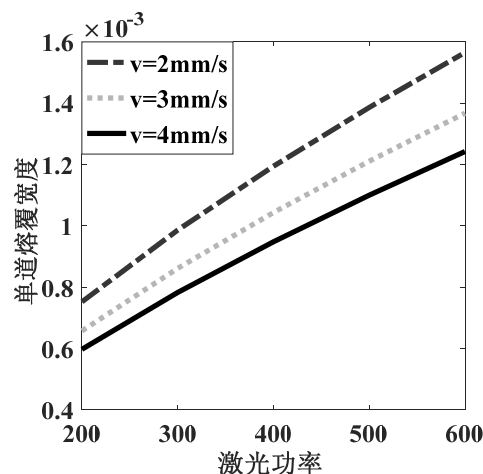


图 2 激光功率与单道熔覆宽度的关系

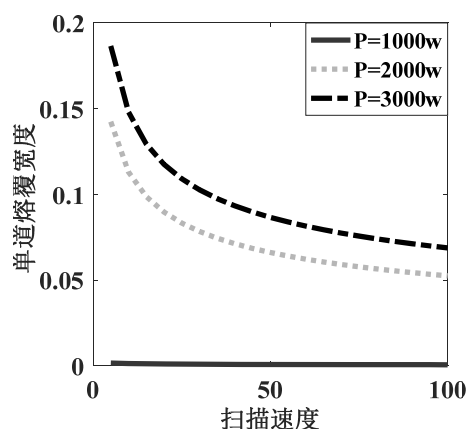


图 3 扫描速度与单道熔覆宽度的关系

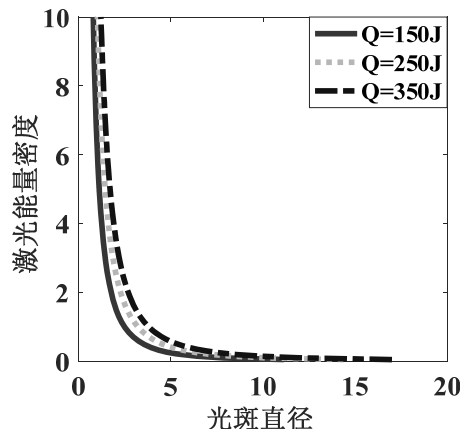


图 4 光斑直径与激光能量密度的关系

4 结论

通过对同步送粉激光熔覆技术原理的分析, 建立了热力学模型, 并针对 10.6 μm 的 CO_2 激光器加热熔覆不锈钢材料 3Cr13 进行了工艺参数的数值模拟分析. 分析结果表明光斑直径越大能量密度越低, 光斑直径越小能量密度越高; 同一功率下, 扫描速度越快, 单道熔覆宽度越小; 扫描速度相同, 功率越大, 单道熔覆宽度也越大. 上述分析方法和结论对同步送粉激光熔覆技术的运用具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] 谭 华, 张凤英, 温如军, 等. 激光立体成形粉末流输送的数值模拟研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 52~59
- [2] 西工大在 3D 新技术研制上获重大突破[J]. 丝网印刷, 2013(1): 53
- [3] 杨 健. 激光快速成形金属零件力学行为研究[D]. 西安: 西北工业大学硕士学位论文, 2004
- [4] 黄卫东, 李延民, 冯莉萍. 金属材料激光立体成形技术[J]. 材料工程, 2002(03): 40~43+27
- [5] 杨海欧. Rene95 合金激光立体成形显微组织与力学性能研究[D]. 西安: 西北工业大学硕士学位论文, 2002
- [6] 王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战(邀请论文)[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3204~3209
- [7] 杨雪坤. 激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的组织 and 阻燃性能研究[D]. 西安: 长安大学硕士学位论文, 2016
- [8] 刘继常. 激光单道熔覆成形的金属零件壁厚模型的研究[J]. 材料科学与工艺, 2005(1): 99~102
- [9] 彭晨宇. 金属板激光弯曲成形实验及数值模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学硕士学位论文, 2008
- [10] 吕金建, 贾长治, 杨建春. 激光能量密度对选区激光熔化成型质量的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(20): 156~159