

基于分形扫描的 TC4 合金激光立体成形研究

马 良, 黄卫东, 许小静

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: 对分形扫描方式在 TC4 合金激光立体成形中的应用展开实验研究, 探讨了分形扫描路径的成形特点, 研究了激光立体成形工艺参数(激光功率、搭接率等)对 TC4 合金成形质量的影响, 提出了分形扫描方式下消除熔合不良和孔洞的方法。研究发现, 分形扫描方式下, TC4 合金成形的的主要缺陷为熔合不良和孔洞, 其主要原因是分形路径拐弯处的沉积高度大于直线扫描时的沉积高度, 从而使成形表面出现凹点; 且随着激光功率的增加、搭接率的提高, TC4 合金成形件的熔合不良和孔洞缺陷有所缓解, 但是仍较明显。根据上述研究结论和分形扫描方式的成形特点, 提出了“半光斑抖动”策略, 即每层扫描起始点沿 x、y 方向偏移半个激光光斑, 从而使上下两个沉积层形成的凹凸点相互叠加, 有效地防止了成形表面质量的恶化。

关键词: 激光立体成形; 分形扫描; TC4 合金

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)10-1731-05

钛合金具有比强度高、热强性好、耐腐蚀、与复合材料的相容性好等优点, 广泛应用于航空航天领域。其中, TC4 合金主要用于制造飞机机身、机翼结构中的各种梁、接头、隔框和航空发动机风扇压气机中的盘件、叶片, 是应用最为广泛的钛合金之一。随着国防及民用工业领域对钛合金制品需求量的增加, 传统生产手段导致的产量低、难加工、成本高等问题日益突出。随着金属激光立体成形技术(Laser Solid Forming, LSF)的不断完善, 该技术已经成为钛合金的一种重要加工手段^[1]。

但是, TC4 合金激光成形仍然存在着很多急待解决的问题, 其中最重要的是激光成形缺陷产生与控制问题。TC4 合金激光成形缺陷一般可以分为两类: 气孔和熔合不良。气孔缺陷的存在主要受到粉末材料的松装密度和杂质的影响; 而熔合不良一般分布在熔覆层的层间和道间, 主要受到工艺参数匹配的影响, 其中主要因素是能量密度、多道间搭接率等^[2~6]。

分形曲线具有非自交、局部与整体相似、可填充任意空间, 生成方法简单等一系列优点^[7]。与传统的光栅式扫描方式比较, 分形曲线设计得到的分形扫描方式, 会使激光成形过程温度场较均匀、瞬时热应力较小, 成形件变形较小^[8,9]。

因此, 本实验首先对 TC4 合金分形扫描方式的成

形特点进行研究与分析, 进而研究在分形扫描方式下, 激光功率、搭接率对 TC4 合金成形质量的影响, 在上述研究的基础上提出了分形扫描的“半光斑抖动”策略, 有效地消除了熔合不良和孔洞现象。

1 实 验

本研究是在西北工业大学凝固技术国家重点实验室建立的激光立体成形系统上完成的, 该系统由 2 kW Nd:YAG 激光器、四轴联动数控工作台、惰性气氛保护箱、高精度送粉器和同轴送粉喷嘴组成。实验在惰性气氛保护箱内进行, 以防止钛合金被 O、N、H 等杂质元素污染。同轴送粉喷嘴保护气和载粉气均采用纯氩。

基材选用纯 Ti 板, 其尺寸为 140 mm×60 mm×6 mm; TC4 粉末为氩气雾化球形颗粒, 粉末粒度为 44~149 μm, 粉末质量分数(%)为 6.02 Al, 4.00 V, 0.098 Fe, 0.033 Si, 0.025 C, 0.04 N, 0.008 H, 0.16 O, 余量为 Ti, 粉未经真空烘干处理后干燥保存备用。

在纯 Ti 基板上进行 TC4 粉末的激光立体成形实验研究方案如表 1 所示。分别对激光功率、搭接率、半光斑抖动对成形件质量的影响进行了实验研究。表 1 中“Vibration”项表示激光立体成形是否采用“半光斑抖动”处理。

收稿日期: 2008-10-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50331010)资助

作者简介: 马 良, 男, 1978 年生, 博士后, 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88494001, E-mail: maliang@nwpu.edu.cn

在激光成形过程中，其他工艺条件不变：激光光斑直径为 1.5 mm，扫描速度为 6 mm/s，送粉量 4 g/min。

激光立体成形采用的扫描路径为 Hilbert 分形扫描曲线，如图 1 所示。其中 R 表示激光光斑半径， d 表示两条短扫描线之间的搭接量， H 表示扫描线间距，则搭接率 α 定义为 $d/2R$ ，即搭接量占光斑直径的比值。搭接率、光斑半径、扫描线间距存在如下关系：

$$H=2R(1-\alpha) \quad (1)$$

2 结果与分析

2.1 分形扫描路径成形特点

为了认识分形扫描路径的成形特点，本研究首先在 $H \gg 2R$ 的情况下 ($H=6 \text{ mm}$, $2R=1.5 \text{ mm}$)，即扫描线间距远大于激光光斑直径，进行 TC4 合金激光立体成形实验（这样烧结路径将不会产生任何搭接，便于分析该路径成形特点），成形结果如图 2 所示。

通过分析可以发现，该路径成形时，所有拐角处的沉积高度较高，如图 2b 中标记 B 所指位置，而其他直线扫描位置，沉积层高度相对一致，都较拐点处的沉积高度低，如图 3 所示。

通过理论分析，即激光成形过程温度场的有限元分析可以发现，在这些拐点处热累积效应要比其他位置剧烈，从而导致拐点处熔池温度场较高，熔池尺寸较大，熔池将有机会捕捉到更多的金属粉末颗粒，从

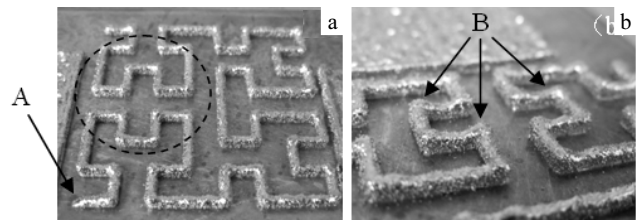


图 2 分形路径的成形特点

Fig.2 Forming features of fractal scanning pattern: (a) overall morphology and (b) local morphology

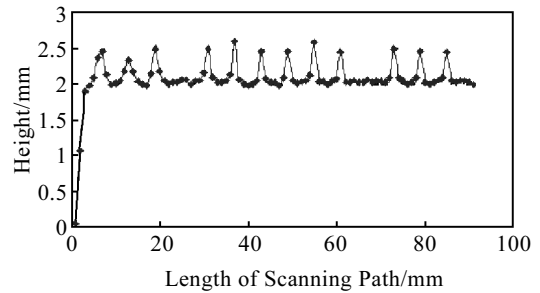


图 3 沉积层高度随位置的变化

Fig.3 Height of sediment layer with the location change

而导致该处沉积层高度较高；另外由于在拐点处，单位时间内激光扫描的面积更小，而送粉量、激光功率等工艺没有改变，也导致更高的沉积层高度。

在实际成形时，成形基板是装夹在数控平台上，激光器固定不动，数控平台与激光器发生相对运动，从而完成分形路径扫描过程。数控平台上的运动是由 X、Y 两个轴的联动完成的，在此拐角处，一个轴的速度要从当前扫描速度减小为零，即做减速运动，相反，另一个轴要做加速运动，即出现急停和启动两个过程，由于数控平台的惯性，完成这两个过程将花费更多的时间。在上述过程中，激光功率和送粉量都没有改变，因此导致该拐点位置质量输入和能量输入的双重累积，恶化了扫描路径上沉积层高度的均匀性。

另外，在激光成形路径的起点位置，高度几乎为零，然后沉积层高度逐渐增加，大约在 2 mm 处达到平均沉积层高度，如图 3 中前几个点所示（如图 2a 中标记 A 所示）。这主要是由于基板初始温度较低，激光提供的热量迅速被基板吸收，导致熔池温度较低、尺寸较小，捕获金属粉末颗粒的能量较低，结果沉积层高度较低。随着激光成形过程的进行，当熔池达到热平衡状态后，这一现象消失。

2.2 分形扫描方式下影响成形质量的因素

2.2.1 激光功率对成形表面质量的影响

图 4 显示了在不同的激光功率下，成形件的表面形貌变化趋势。在相同的扫描速率及搭接率(50%)下，

表 1 TC4 合金激光立体成形工艺参数

Table 1 Parameters of the LSF process for TC4 alloy

Number of samples	Laser power/W	Overlap rate/%	Vibration (Yes/No)
No.1	1000	50	No
No.2	1200	50	No
No.3	1500	50	No
No.4	1500	30	No
No.5	1500	40	No
No.6	1500	30	Yes
No.7	1500	40	Yes
No.8	1500	50	Yes

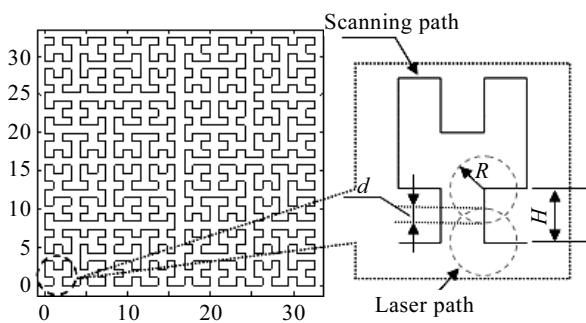


图 1 Hilbert 分形扫描路径

Fig.1 Hilbert fractal scanning pattern

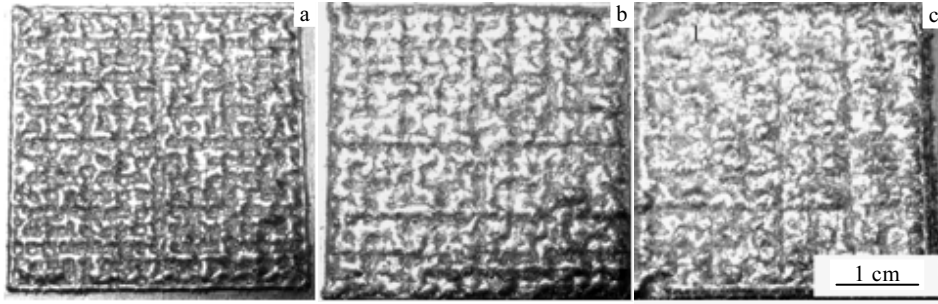


图 4 不同激光功率下成形件表面形貌

Fig.4 Surface morphology with different laser powers: (a) $P=1.0$ kW, (b) $P=1.2$ kW, and (c) $P=1.5$ kW

激光功率 P 增大, 道间凹槽及孔洞等熔合不良逐渐减少, 当功率增大到 1.5 kW 的时候, 表面质量较好, 但是仍然存在少量孔洞。实际上激光功率越大, 所形成的熔池面积越大, 单层涂覆宽度也增大, 相当于增大单道搭接率, 因此实际搭接率是随着功率的增大而增大的。

图 5 给出了孔洞数随激光功率变化的趋势。可以看出, 熔合不良导致的孔洞数随着激光功率的增加而减少, 但仍然无法完全消除。

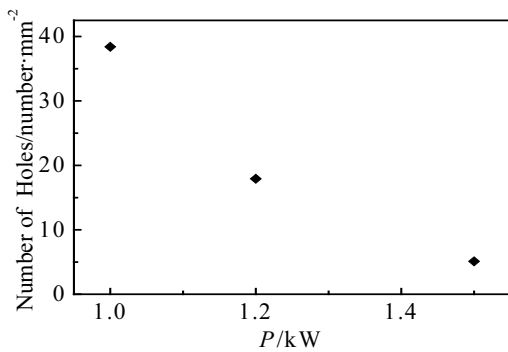


图 5 孔洞数随激光功率变化趋势

Fig.5 Variation of number of holes with different laser powers

2.2.2 搭接率对成形质量的影响

图 6 显示了在不同的搭接率下, 成形件的表面空洞尺寸变化。搭接率增大后, 熔合不良导致的孔洞尺寸减小, 表面质量明显提高。实验发现, 当搭接率选择 50%左右的时候, 表面质量较好, 熔合不良导致的孔洞尺寸减小, 熔合不良情况有所缓解, 但仍然无法消除。

2.3 缺陷形成机理分析与消除办法

采用分形扫描方式成形 TC4 合金的时候, 道间熔合不良导致的孔洞成为最主要的缺陷, 影响这种缺陷的主要因素则是激光功率密度和搭接率。

在二维平面内多道熔覆层相互搭接从而完成该层内预定图形的填充。选择小搭接率时, 相邻两道熔覆层之间有一条明显的凹陷区, 如果相邻两道熔覆层之间的凹陷区较深, 下一层熔覆时此处易于形成孔洞等缺陷, 这将使成形件的致密度降低, 从而影响到成形件的力学性能。搭接率增大显然有利于减小熔覆道之间凹陷区的深度。只有搭接率适当, 相邻两道熔覆层之间的表面平整, 各道熔覆层总体平整, 所获沉积表面质量才较理想。

对于传统的直线扫描方式, 一般搭接率选择 40%左右较为合适。但是对于分形扫描方式, 通过实验发现, 即使采用 50%的搭接率, 仍然无法完全消除孔洞



图 6 不同搭接率下成形件的表面质量

Fig.6 Surface morphology change with different overlapping rates: (a) 30%, (b) 40%, and (c) 50%

的存在, 这是由分形扫描方式的路径特点决定的。

图 7 所示的路径(黑色实线所示)为图 2a 中虚线所圈定的局部分形扫描路径, 其中 A、B、C、D 表示激光光斑运动到顶角位置时的光斑示意图, H 表示扫描间距。

假设光斑 A-B、B-D、D-C、C-A 之间的搭接率为 50%, 根据公式(1)可以计算得到: 光斑 A-D、B-C 之间的搭接率为 $1 - \sqrt{2}/2 \approx 0.2929$, 因此图 7 中 O' 点所在位置的沉积厚度最小, 而周围沉积层厚度较厚, 即在 O' 点位置形成凹点。

通过上述分析发现, 孔洞的产生是由分形扫描路径自身特点决定的。通过对分形扫描路径的成形特点的分析, 本研究提出采用“半光斑抖动”方法消除缺陷, 即将每层的路径成形起始点偏移半个激光光斑, 如图 7 中光斑 C 的圆心沿着虚线偏移到 O' 点位置。由于 O' 为凹点, 而光斑 C 的圆心位置沉积层高度最高, 两者相互抵消, 从而有效地抑制了成形表面质量的不断恶化。

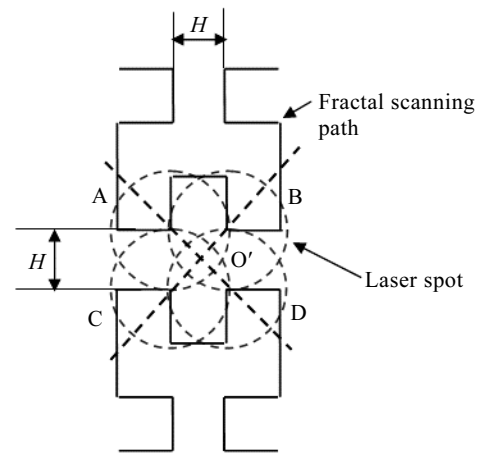


图 7 局部分形扫描路径

Fig.7 Local fractal scanning path

图 8 显示了在采用半光斑抖动以后, 熔合不良的现象明显改善, 孔洞尺寸大幅度减小。

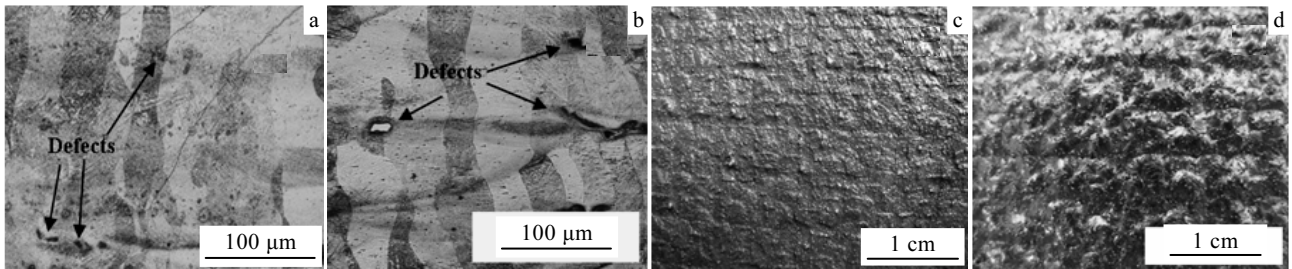


图 8 半光斑抖动对表面质量及熔合不良的改善

Fig.8 Effects of semi-spot vibration on fusion defects: (a) with vibration, (b) without vibration, and surface morphology, (c) with vibration, and (d) without vibration

3 结 论

1) TC4 合金激光分形扫描过程中, 在路径拐角处沉积厚度较厚, 而在直线扫描路径处, 沉积厚度较薄, 易于在 4 个顶角所夹的区域内形成凹谷, 从而恶化成形件表面质量, 因此分形扫描激光立体成型的主要缺陷为道间熔合不良导致的孔洞缺陷。

2) 随着激光功率、搭接率的提高, 熔合不良和孔洞缺陷有所改善, 但是缺陷仍然比较明显。

3) 通过采用“半光斑抖动”方法, 选择比较合适的成形工艺参数, 可以明显改善熔合不良和孔洞等缺陷, 提高成形件的质量。

参考文献 References

[1] Huang Weidong(黄卫东) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2002, 03: 40
 [2] Xue Lei(薛蕾) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(6): 989

[3] Xue Lei(薛蕾) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(11): 1817
 [4] Zhang Fengying(张凤英) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(2): 211
 [5] Chen Jing(陈静) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(3): 475
 [6] Yu Jun(于君) et al. *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2007, 34(7): 1014
 [7] Bin Hongzan(宾鸿赞). *Planning, Control, Application of Fractal Scanning Path*(分形扫描路径的规划·控制·应用)[M]. WuHan: Huazhong University of Science and Technology (HUST) Press, 2006
 [8] Ma Liang, Bin Hongzan. *The International Journal of Advance Manufacturing Technology*[J], 2007, 34: 898
 [9] Liu Zhengyu(刘征宇) et al. *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 1999, 10(8): 848

Research on Laser Solid Forming of TC4 Alloy Based on Fractal Scanning

Ma Liang, Huang Weidong, Xu Xiaojing

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The application of fractal scanning pattern in laser solid forming (LSF) of TC4 alloy was investigated through experiments. The forming characteristics of the fractal scanning path were discussed and the influence of process parameters (laser power, overlap rate etc) on the forming quality of TC4 alloy was studied. A method of eliminating the formation defects under fractal scanning pattern was proposed. Study shows that under fractal scanning pattern, the main defects of TC4 alloy formed by the LSF process are ill bonding and porosity, because the height of deposition at the corner of the fractal path is larger than that under linear scanning pattern resulting in the concave on the formation surface. The defects including ill bonding and porosity are relieved to some extent with the increase of the laser power and overlap rate, but still obvious. According to the obtained conclusion and formation characteristics of fractal scanning pattern, a "semi-spot vibration" strategy is proposed. The strategy means that the beginning scanning position of each layer offset by half a laser spot along x and y direction to make the concave; therefore the convex formed by two adjacent deposition layers respectively overlap each other and thus the deterioration of surface quality is restricted effectively.

Key words: laser solid forming (LSF); fractal scanning; TC4 alloy

Biography: Ma Liang, Postdoctor, State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88494001, E-mail: maliang@nwpu.edu.cn