DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.10.002

脉冲激光选区熔化成形薄壁件研究

金强强,张 俊,袁自均

(合肥工业大学电子科学与应用物理学院,安徽合肥230009)

摘 要:为提高选区激光熔化(SLM)直接成形薄壁件的能力,讨论了脉冲时间,激光功率,扫描速度等成形工艺参数对单熔道的影响。采用自主研发的选区激光熔化成型设备和优化的脉冲激光,制备了不同角度的倾斜薄壁件。探论了成形角度范围在 0~90°的弧形薄壁件。结果表明,减小脉冲作用时间,有利于提高薄壁工件的精度和减少热积累对薄壁件的影响。脉冲激光在成形网格薄壁件时,可以明显改善"鼓包"问题。

关键词:选择性激光熔化;脉冲激光;倾斜薄壁件;极限角度

中图分类号: TG249 文献标识码:A 文章编号:1000-8365(2020)10-0905-06

Research on Forming of Thin-walled Parts Using Pulsed Laser Selective Melting

JIN Qiangqiang, ZHANG Jun, YUAN Zijun

(School of Electronic Science and Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to improve the ability of selective laser melting (SLM) to directly form thin-walled parts, the effects of forming process parameters such as pulse time, laser power, and scanning speed on single melt channels were discussed through experiments. In the self-developed selective laser melting molding equipment, optimized pulsed laser is used to form inclined thin-walled parts with different angles. The results show that reducing the pulse action time is beneficial to improve the accuracy of thin-walled workpieces and reduce the effect of heat accumulation on thin-walled workpieces. Pulsed laser can significantly improve the "bulge" problem when forming thin-walled mesh parts. Finally, the arc-shaped thin-walled parts with a forming angle ranging from 0 to 90° are discussed, which provides a certain reference for SLM to form arc-shaped workpieces at any angle.

Key words: selective laser melting; pulsed laser; inclined thin-walled parts; extreme angle limit angle

选区激光熔化 (selective laser melting, SLM)技 术理论上可以成型任意复杂形状的金属零件,大多 采用连续激光器提供能量。但连续激光在成形薄壁 零件时,由于受热累积的影响,无法达到精度高、壁 厚薄。而薄壁件由于其重量轻、结构紧凑等独特优 点,广泛应用于航空、航天,电子设备及元器件的散 热装置^{III}。

华南理工大学罗子艺等人^[2]采用连续激光器, 通过实验研究了粉末密度和激光扫描能量对 316L 不锈钢粉末密度和悬垂面极限成型角度的影响。实 验表明:提高预置粉末密度可以提高悬垂面成型的 极限角度;在层厚是 25 μm 时,激光扫描能量输入 在 0.15~0.20 J/mm 时悬垂面成型精度最高,悬垂面 翘曲最小,成型工件的倾斜角度达到 30°。

北京工业大学张冬云等¹³利用 EOS 的 M270 设

收稿日期:2020-05-29 作者第合:今强强(1991_) 安徽合制

作者简介:金强强(1991-),安徽合肥人,硕士生.研究方向:三维 打印技术.电话:15156527165, E-mail:1916701269@qq.com 备加工纯镍粉,直壁薄板的加工极限为 0.2 mm。板 厚 0.2 mm 以上的薄壁成形稳定性很好,同一批 次样件、同一样件不同位置的误差均控制在 20 μm 以下。

本文首先通过实验分析了,在脉冲激光模式下, 选择性激光熔融中不同脉冲时间、激光功率、扫描速 度等对单熔道成形效果的影响。接着使用优化后的 参数,成形 12 mm×12 mm×10 mm 的长方体物块,并 对加工时每层表面的温度进行测量。结果表明,热积 累是影响薄壁件成形的一大因素。基于脉冲激光的 SLM 技术,成形倾斜薄壁件,极限角度为 25°。同时, 在合适的参数下,可以有效的解决网格薄壁件的"鼓 包"问题。对不同角度的弧形工件进行了初步试验。

1 实验设备及实验材料

1.1 实验设备

采用的实验设备是合肥工业大学三维打印中自 主研发的 SLM 快速成形设备,其主要由光纤激光器、光路传输单元、密封成型室(包括铺粉装置)、机 械传动及控制系统、工艺软件等几个部分组成。激光 由扫描振镜导向,然后通过 f-θ 透镜聚焦,选择性地 将成型面上的金属粉末熔化堆叠成金属零件^[4]。所 有的成形实验都在尺寸 50 mm×50 mm×5 mm 的不 锈钢基板上进行。使用精密测量显微镜(XHC-M)测 量单熔道的宽度。

采用 SA-DXA 系列激光红外测温仪和 DAM0A02数据采集卡搭建了红外测温系统,用于 实时监测加工过程中工件表面的温度变化,如图1。



Fig.1 Schematic diagram of temperature measurement system

实验选用德国生产的 316 不锈钢粉末,此不锈 钢粉末由气雾化法制得。该粉末的颗粒大小服从正 态分布,粒径范围为 15~53 um。该粉末最大含碳量 为 0.07%,可以成形耐腐蚀工件。表 1.1 为 316 不锈 钢粉末材料组成成分与粉末的松装密度。

表1 316L不锈钢粉末化学组成成分 w(%) Tab.1 Chemical composition of 316L powder

Cr	Ni	Cu	Mn	Si	Mo	Nb	С	Fe
15.0~17.5	3~5	3~5	1	1	0.5	0.35	0.07	Balance

2 单道研究

2.1 激光功率

连续激光,激光泵浦源持续提供能量,长时间 持续不断的产生激光输出,从而得到连续激光。相 比于脉冲激光模式下,连续激光的输出功率一般都 比较低。脉冲激光:脉冲工作方式是指每间隔一定 时间才工作一次的方式,脉冲激光器具有较大的峰 值输出功率^[5]。为了明晰不同脉冲作用时间下激光 设定功率与激光输出功率间的关系,本文把脉冲频 率固定在 10 kHz 的条件下,对不同的参数下的功率 进行了测量。在计算机控制端输入设定功率,输出 端用 Newport 激光功率计测量输出的功率。实验数 据如图 2。

很明显,输出功率上限与脉冲作用时间有关。 这是由激光器的性能决定的,当激光功率设定后, 随着脉冲作用时间的减小,脉冲峰值功率会相应 增大,但其上限不会超过连续输出模式下的最大 功率⁶。



图 2 不同脉冲作用时间下设定功率与输出功率的关系 Fig.2 The relationship between set power and output power under different pulse action time

2.2 单道研究

设定脉冲频率为 10 kHz, 扫描速率为 0.1~ 0.5 m/s。在不同激光输出功率和脉冲作用时间下进 行单熔道实验,发现脉冲作用时间小于 20 μs 时,最 大输出功率条件下,无法完全熔化金属粉末、形成规 则的熔道;另一方面,当脉冲作用时间大于 60 μs 时,成形的单道与连续激光差别不大。故实验中的脉 冲作用时间应当在 20~60 μs,分别选择了 20、30、 40、50 和 60 μs,结合图 2 中的功率上限数据,输出 功率(即设定功率)分别选择为 70、100、120 W。实 验结果如图 3。

激光功率,扫描速度是常见的影响熔道宽度的 因素。但在实际成形试验中,在输入相同的能量下, 脉冲时间是不可忽略的因素。由于激光能量服从高 斯分布,减小脉冲时间,可以提高峰值功率。随着作 用在金属粉末上的作用时间减少,熔化金属粉末的 阈值能量可能达不到。如图 3,当单熔道宽度是 50 µm 左右时。此时不是真正意义上的单熔道宽度。因为金 属粉末的最大直径是 50 µm。当作用时间达到 100 µs 时,是连续激光。

316 不锈钢金属粉末有一固定的熔化阈值,在 激光功率不变的条件下,压缩作用时间会相应的增 加脉冲峰值功率,但其上限不会超过连续输出模式 下的最大功率。如图可知,脉宽是 20 μs,*P*=70 W,已 达其到峰值功率。由图 4(a)可知,此时单熔道断断 续续、不均匀,熔道周围毛刺较多。脉冲激光时间不 能太短,否则无法提供足够的能量去熔化金属粉末。

随着脉冲时间的增加,作用在金属粉末上的能量也在增加。如图图 4(b)和图 4(c)此时熔道成连续、均匀,熔道周围毛刺现象逐渐减轻。

如图 4(d)从单道形貌上看,连续激光的熔道均 匀平滑连续^[7]。但是,我们不能忽略散热问题。单道 实验是在基板上做单层实验,所以散热较好。实际用 连续激光成型薄壁件及精细零件时,往往由于热积



(c)20 µs下单道宽度

(d)20 µs下单道宽度

Fig.4 Single melt channel morphology formed under different pulse parameters (the best melt channel under each parameter)

累而导致成形失败。

2.3 实体工件研究

实体工件(12 mm×12 mm×10 mm)打印实验, 成形 350 层,红外测温仪实时监控记录下每一层的 温度,对比了脉冲激光和连续激光成型温度。激光 频率保持 10 kHz 不变,脉冲条件下设定激光输出功 率为 70 W、扫描速率降为 0.3 m/s、扫描间隔为 40 μm,脉冲作用时间分别选择 20、30、40 μs;连 续激光设定功率 120 W、扫描速率降为 0.3 m/s、 扫描间隔为 40 μm。

图 5(a)和(b)整体工件的温度随成形层变化趋势与连续激光的一致,相比于连续激光,脉冲激光 在相同的层数温度升高的较小。如图 5(b)随着脉冲 功率的增加,可以很明显的看到温度在明显升高。 相同成形参数下,脉冲时间增加,相当于激光停留 照射粉末的时间增加,即输入粉末的能量增加,故而 40 μs 的温度升高的比 20 μs 和 30 μs 的快。另一方 面,在激光功率不变的条件下,增加作用时间意味着 降低脉冲峰值功率,由于激光能量是呈高斯分布的, 聚焦光斑中能够熔化金属粉末的有效能量减小。这 也是脉冲激光成形实体工件,相比连续激光成形工 件密度低的主要原因¹⁸。

在 30 层左右都有温度的突变,主要是前 30 层 靠近基板,热量很容易传导到基板,工件散热快。当成 型层渐渐远离基板,四周又是金属粉末,导热性差^[9]。 激光输入的能量,一部分除了熔化金属粉末,另一部 分通过热量的方式向周围传导,故而成形层温度越 来越高。在实际成型工件时,一定要注意热积累所引 起的温度变化,特别是成型多层工件时,适当的调整 工艺参数,有利于提高多层工件的成型质量。

图 4 不同脉冲参数下下形成的单熔道形貌(各参数下,最好熔道)





F化 (b)脉冲激光作用下工件表面温度随层数的变化

图 5 连续激光和脉冲激光作用下工件表面温度随层数的变化

Fig.5 The change of the parts surface temperature with the number of layers under the action of continuous laser and pulse laser

脉冲激光,峰值功率高,作用时间相对被压缩。 从给工件散热提供了散热时间,有利于成形薄壁件。

3 薄壁的研究

3.1 等倾薄壁件

倾斜薄壁件在分层切片时会形成没有下层支 撑的悬垂部分,悬垂部分的长度:

$$S = d \cdot \cot\theta$$
 (1)

分层切片,层与层之间的搭接率:

$$\psi = (L-S)/L \tag{2}$$

其中,*d*为单层厚度,*θ*为该层轮廓与水平面所成的 夹角,*L*为单道的宽度(如图 1)。

由图 6 (a)1~5 倾斜角度依次为 25°、30°、35°、 40°和 45°。图 6(b)可知,θ越小意味着层与层间悬 空距离 S 越大,层与层之间的搭接率ψ越小,成形 效果越差;当 S 大于单道直径 L,此时层与层完全脱 离(ψ 为负值),激光聚焦光斑完全落在粉末支撑区 域上成型悬垂面,激光能量过度熔化粉末,导致熔 池体积很大,并沉陷到粉末中,产生球化,成形无法 继续。为了稳定成型悬垂面,S 须小于单道半径,使 激光光斑大部分在实体支撑区域进行扫描。根据实 际 316 不锈钢粉末的粒径,选择合适的层厚,这里 选择层 d=30 μm。根据式(1),S 需小于单道直径



(a)等倾斜角薄壁件实体工件

64 μm(脉宽 20 μs,扫描速度 V=0.2 m/s,平均功率 P=70 W),得出 $\theta \approx 25^{\circ}$ 是 SLM 成型倾斜薄壁结构 的最小倾斜角(v=0);而当 S 小于单道半径时,则得出 θ =45°是 SLM 成型倾斜薄壁结构的可靠成型角度(ψ 大于 50%)。

3.2 网格薄壁件

激光频率固定在 10 kHz 分别用 30 µs 和 100 µs,功率 90 W,扫描速度 0.3 m/s。图 7(a)连续 激光成型网格变形严重,在实际成型中当达到 30 层 左右,由于刮刀而导致铺粉较差而成型失败。主要由 于 30 层之后温度剧变,散热不理想,这一点刚好验 证测温结果。特别值得注意的是网格交叉点处,由于 二次重熔,凸起严重,这也是实际成型中影响铺粉的 主要原因。图 7(b)脉冲激光下,在显微镜下观察了 零件孔的大小均匀、规则。合适的激光参数解决了交 叉点的鼓包问题。

3.3 弧形薄壁件

激光频率 10 kHz, 功率 70 W, 扫描速度 0.2 m/s, 作用时间 20 µs, 扫描方式二次扫描, 弧形工件半径 *R* 依次为 4.5、5.0、5.5、6.0 mm, 如图 8(b)。在实际加 工过程中,随着加工层数的增大(曲率变小, 倾斜角 也变小), 当层间距大于熔道半宽时; 我们把这部分 称为第一区域^[10], 如图 8(e), 夹角在 90°~45°, 此时的



(b)等倾斜角薄壁件切片原理



Fig.6 The principle of slicing thin-walled parts with equal inclination and solid parts



(a)显微下的连续激光成型网格形貌 (b)显微下的脉冲激光成型网格形貌 图 7 显微形态

Fig.7 Microscopic morphology

层间搭接率在 50%以上;加工过程中铺粉均匀,成 型件表面光泽度好,此阶段成型质量较好。当层间 距大于熔道半宽而小于熔道宽度时;这部分称为第 二区在 45°~26°;此时成形质量一般,工件表面粗 糙,铺粉轻微碰刀,此时弧形工件出现"阶梯效应" ¹¹¹。由于搭接率下降,层间悬垂部分增大。继续加工, 当层间距大于熔道宽度时:第三区域,夹角在 0~25°,我们发现此时成型的都是球化粘接的粉末。



(a)弧形薄壁实体工件



(b)不同倾斜角弧形薄壁实体工件



500 µm

由于层间距离过大,熔化的单道浸润不到固体,此时

完全在粉末上加工,粉末成了此时固化熔道的支撑, 如图 8(b)顶部。由于粉末的导热性差,浸润能力差,

此时呈现出过烧和球化。此时,改变激光的作用时

间,降低热积累效应。所以 SLM 成形倾斜角太小的

等厚薄壁工件,在实际加工应尽量选择脉宽较小的

激光模式,如图 8(c)半碗底区域。

(d)碗型薄壁实体工件



(e)弧形薄壁件切片原理图图 8 曲面薄壁零件的切片原理及实体工件Fig.8 Slicing principle and solid workpiece of curved thin-walled parts

4 结论与总结

(1)对于脉冲工作模式,当脉冲作用时间较小时,一定要注意设定的激光可能与输出功率的关系。由于激光器本身的限制,脉冲功率达不到连续模式下的最大功率。

(2)脉冲作用时间是影响薄壁件成形的关键 因素之一。在激光能量相同的前提下,合适脉冲时 间有利于工件的散热,提高薄壁件的成形质量和成 形极限角度。

(3)恰当的脉冲工艺参数,可以有效的解决网 格薄壁件交叉点重熔"鼓包"问题。

参考文献:

[1] 刘超等.基于有限元的选择性激光熔化薄壁成型的熔池研究[J].
 研究与探索·工艺与技术,2018,07,04:136-139.

(下转第920页)

拟结果看出,对于 HT300 主轴箱铸件所设置的冒口,实现了液态收缩的金属液补充功用,同时在凝固中后期,能够及时封闭补缩通道,实现灰铸铁石墨化膨胀自补缩功用。经过不同冷铁方案的优化,如图 8(a)所示,由于 1# 位置是最后凝固的部位,



(a)无外冷铁

HT300 凝固过程中的石墨化膨胀并未完全补缩体积 收缩,出现了较大的缩孔缺陷,为此,在1#位置处增 设冷铁进行激冷,当最终消除了主轴箱铸件疏松缩 孔缺陷,模拟结果见图 8(b)。







3 结论

(1)经过对某型机床主轴箱铸件结构特点的 分析,确定了 ∑A_内:∑A_做:∑A_直=1:1.4:1.2 的中注缓 流式浇注系统,浇注温度1370℃,浇注速度为5.7kg/s, 主轴箱铸件与砂箱换热系数为500 W/m²·K,铸件与 冷铁间换热为3000 W/m²·K。

(2)通过对 ProCAST 铸件成形过程数值模拟结 果分析,经过合理设置冷铁和圆台形暗压边冒口,能 够使得主轴箱铸件的充型及凝固过程合理,并有效 避免缩松缩孔的缺陷产生,对于该型机床主轴箱铸 件的实际生产具有指导性意义。

参考文献:

[1] 卜昆. 计算机辅助制造[M]. 北京:科学出版社, 2014.

(上接第909页)

- [2] 罗子艺. 薄壁零件选区激光熔化制造工艺及影响因素研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.
- [3] 张冬云,曹扬,李丛洋. SLM 制造金属微小结构件可行性研究[J].
 电加工与模具, 2016(3):0042-05.
- [4] 王黎. 选择性激光熔化成形金属零件性能研究[D]. 武汉:华中科 技大学,2012.
- [5] Ali Gökhan Demir& Paolo Colombo& Barbara Previtali .From pulsed to continuous wave emission in SLM with contemporary fiber laser sources: effect of temporal and spatial pulse overlap in part quality[J] Int J Adv Manuf Technol, 2017(10).
- [6] 张俊. 选择性激光熔融脉冲加工工艺参数的研究[D]. 合肥:合肥 工业大学,2019.
- [7] 徐红祥.选择性激光熔融成型层温度特性的研究[D]. 合肥:合肥 工业大学,2018.

- [2] 徐贵强,郑蕊,包学春,等.薄壁汽车零部件精铸工艺设计[J].特 种铸造及有色合金,2019,39(11):1229-1231.
- [3] 郑端,师素粉,任朋立. 基于 ProCAST 软件的 ZL101 航空壳体 铸件的工艺研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(13):90-91, 98.
- [4] 刘艺,王华.基于 Procast 的上倾倒框铸造工艺设计优化[J].热 加工工艺, 2019, 48(15):72-77.
- [5] Kumar R, Madhu S. Casting design and simulation of gating system in rotary adaptor using procast software for defect minimization, Materials To day: Proceedings, Volume 22, Part 3,2020: 799-805.
- [6] 铸造手册第5卷,中国机械工程学会铸造分会编,铸造工艺[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [7] 王荣, 隋欣梦, 魏德强, 等. 基于 ProCAST 的龙门加工中心滑枕 铸件的数值模拟分析[J]. 铸造技术, 2016, 37(9):2017-2020.

- [8] Leonardo Caprio*, Ali Gökhan Demir, Barbara Previtali.Influence of pulsed and continuous wave emission on melting efficiency in selective laser melting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 11. 019.
- [9] Yali Li, Dongdong Gu. Thermal behavior during selective laser melting of commercially pure titanium powder: Numerical simulation and experimental study [J].Additive Manufacturing, 2014, (1): 99-109.
- [10] 段声勤,刘婷婷,廖文和,等. 悬垂圆孔激光选区熔化成形质量 研究[J]. 中国激光 2018(4):40.
- [11] Giovanni Strano*, Liang Hao, Richard M. Everson, Kenneth E. Evans. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting[J]. Journal of Materials Processing Technology 213 (2013) 589-597.