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[1]。

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[3]利用 EOS 的 M270 设备加工纯镍粉,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

收稿日期:2020-05-29
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

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。

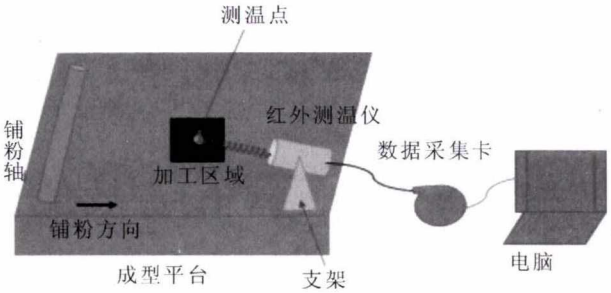


图 1 测温系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of temperature measurement system

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	C	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]。

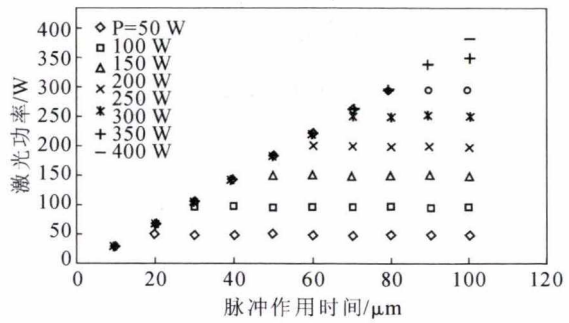


图 2 不同脉冲作用时间下设定功率与输出功率的关系
Fig.2 The relationship between set power and output power under different pulse action time

2.2 单道研究

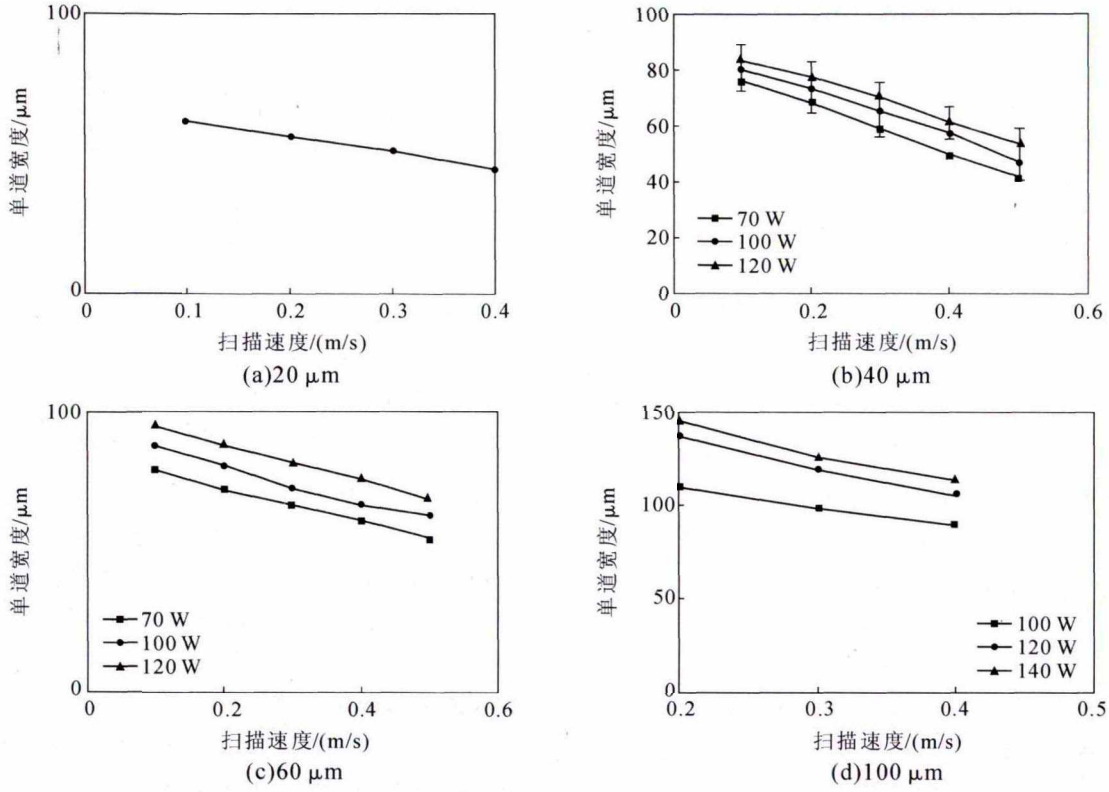
设定脉冲频率为 10 kHz，扫描速率为 0.1~0.5 m/s。在不同激光输出功率和脉冲作用时间下进行单熔道实验，发现脉冲作用时间小于 20 μs 时，最大输出功率条件下，无法完全熔化金属粉末、形成规则的熔道；另一方面，当脉冲作用时间大于 60 μs 时，成形的单道与连续激光差别不大。故实验中的脉冲作用时间应当在 20~60 μs，分别选择了 20、30、40、50 和 60 μs，结合图 2 中的功率上限数据，输出功率(即设定功率)分别选择为 70 、100 、120 W。实验结果如图 3。

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。

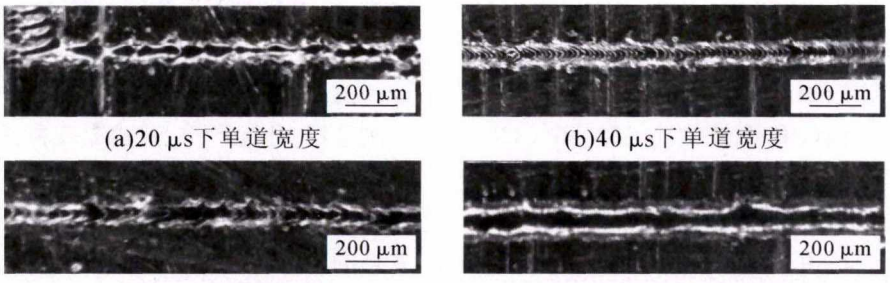
如图 4(d)从单道形貌上看，连续激光的熔道均匀平滑连续[7]。但是，我们不能忽略散热问题。单道实验是在基板上做单层实验，所以散热较好。实际用连续激光成型薄壁件及精细零件时，往往由于热积



(a)20 μm　(b)40 μm　(c)60 μm　(d)100 μm

图 3 不同脉冲工艺参数下的单道宽度

Fig.3 Single channel width under different pulse process parameters



(a)20 μs下单道宽度　(b)40 μs下单道宽度

(c)20 μs下单道宽度　(d)20 μs下单道宽度

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)

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

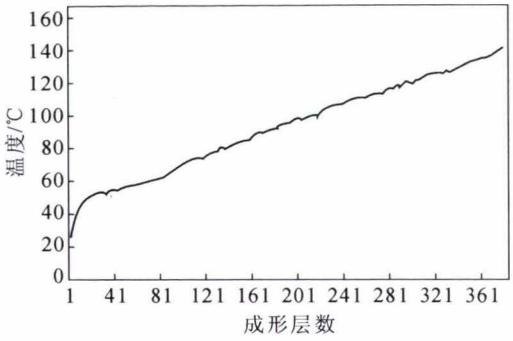
累而导致成形失败。

2.3 实体工件研究

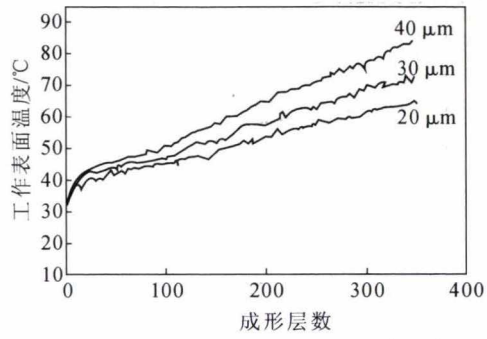
实体工件(12 mm×12 mm×10 mm)打印实验，成形 350 层，红外测温仪实时监控记录下每一层的温度，对比了脉冲激光和连续激光成型温度。激光频率保持 10 kHz 不变，脉冲条件下设定激光输出功率为 70 W、扫描速率降为 0.3 m/s、扫描间隔为 40 μm，脉冲作用时间分别选择 20、30、40 μs；连续激光设定功率 120 W、扫描速率降为 0.3 m/s、扫描间隔为 40 μm。

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[8]。

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。



(a)连续激光作用下工件表面温度随层数的变化



(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:

$$S=d\cdot\cot\theta \tag{1}$$

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)。

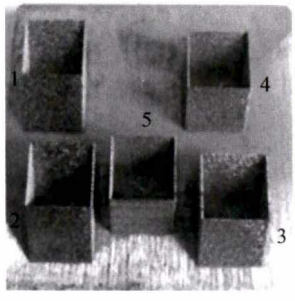
由图 6 (a)1~5 倾斜角度依次为 25°、30°、35°、40°和 45°。图 6(b)可知,θ 越小意味着层与层间悬空距离 S 越大,层与层之间的搭接率 ψ 越小,成形效果越差;当 S 大于单道直径 L,此时层与层完全脱离(ψ 为负值),激光聚焦光斑完全落在粉末支撑区域上成型悬垂面,激光能量过度熔化粉末,导致熔池体积很大,并沉陷到粉末中,产生球化,成形无法继续。为了稳定成型悬垂面,S 须小于单道半径,使激光光斑大部分在实体支撑区域进行扫描。根据实际 316 不锈钢粉末的粒径,选择合适的层厚,这里选择层 d=30 μm。根据式(1),S 需小于单道直径 64 μm(脉宽 20 μs,扫描速度 V=0.2 m/s,平均功率 P=70 W),得出 $\theta\approx25°$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

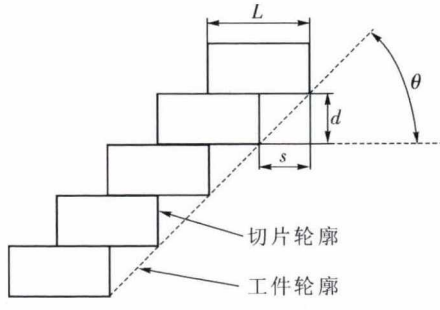
激光频率固定在 10 kHz 分别用 30 μs 和 100 μs,功率 90 W,扫描速度 0.3 m/s。图 7(a)连续激光成型网格变形严重,在实际成型中当达到 30 层左右,由于刮刀而导致铺粉较差而成型失败。主要由于 30 层之后温度剧变,散热不理想,这一点刚好验证测温结果。特别值得注意的是网格交叉点处,由于二次重熔,凸起严重,这也是实际成型中影响铺粉的主要原因。图 7(b)脉冲激光下,在显微镜下观察了零件孔的大小均匀、规则。合适的激光参数解决了交叉点的鼓包问题。

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



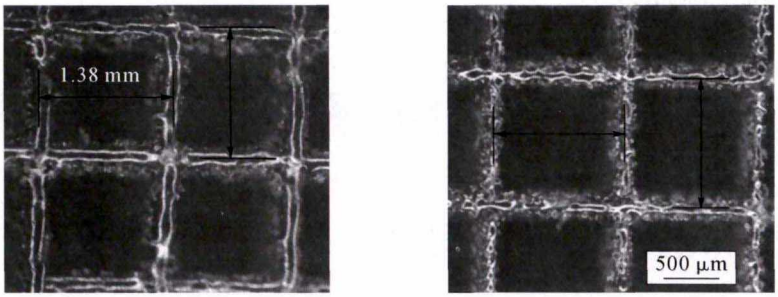
(a)等倾斜角薄壁件实体工件



(b)等倾斜角薄壁件切片原理

图 6 等倾薄壁零件切片原理

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

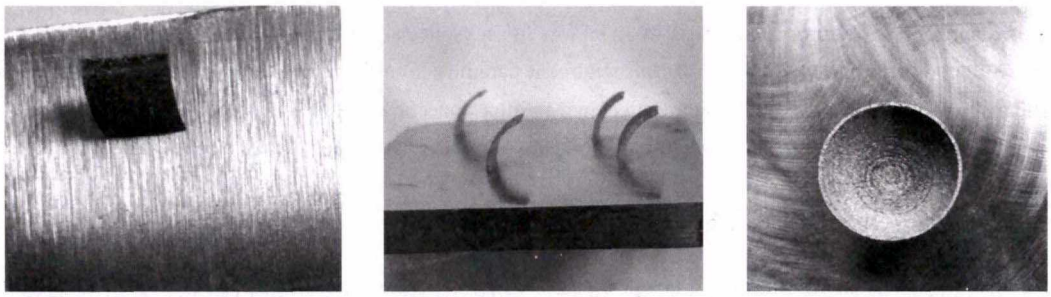


(a)显微下的连续激光成型网格形貌　(b)显微下的脉冲激光成型网格形貌

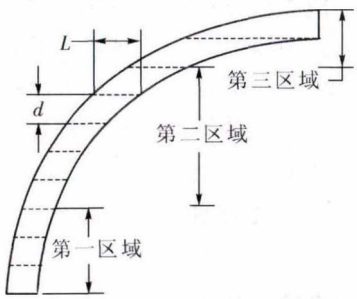
图 7 显微形态

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”[11]。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。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。



(a)弧形薄壁实体工件　(b)不同倾斜角弧形薄壁实体工件　(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。

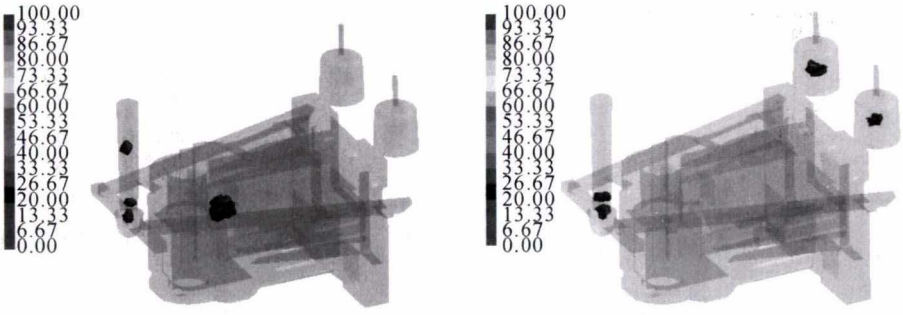
(3)恰当的脉冲工艺参数，可以有效的解决网格薄壁件交叉点重熔“鼓包”问题。

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，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)。



(a)无外冷铁　　(b)缺陷处加外冷铁

图 8 主轴箱铸件缩松缩孔及消除的模拟

Fig.8 Simulation of shrinkage porosity and shrinkage hole and elimination of spindle box casting

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 $\Sigma A_{内}:\Sigma A_{横}:\Sigma A_{直}=1:1.4:1.2$ 的中注缓流式浇注系统，浇注温度 1370 ℃，浇注速度为 5.7 kg/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 3 000 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.

[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.

(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.

[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.