

文章编号 1004-924X(2012)04-0699-07

## 多零件选区激光熔化成型效率的优化

刘杰\*, 杨永强, 苏旭彬, 肖冬明

(华南理工大学机械工程学院, 广东广州 510640)

**摘要:**对多零件选区激光熔化的成型效率进行了优化。首先,分析了多零件选区激光熔化成型过程的时间消耗,并以减少时间消耗为目标建立了3维零件在3维成型空间中的2.5维排料优化规则。然后,研究了2.5维自动排料,提出利用3维零件模型在2维平面区域的投影将2.5维排料转化为2维排料的简化方法和一种利用切片数据进行投影生成的算法。最后,为验证所述方法的有效性,以手术模板模型为例,在虚拟选区激光熔化系统VDeMetal280上进行了优化实验。与优化前相比,优化后的成型次数从4次降为3次,在扫描速度为600 mm/s、切片层厚为0.035 mm、扫描间距为0.08 mm的工艺参数下,总铺粉次数从3 892次降为2 231次,预计加工时间从约91 276 s降为69 918 s,时间消耗有明显减少。

**关键词:**激光技术;选区激光熔化;多零件;成型效率;2.5维排料

**中图分类号:** TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122004.0699

## Efficiency optimization of selective laser melting for multi-parts

LIU Jie\*, YANG Yong-qiang, SU Xu-bin, XIAO Dong-ming

(College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

\* Corresponding author, E-mail: jie.liu.scut@gmail.com

**Abstract:** An optimized method was proposed to improve the processing efficiency of Selective Laser Melting (SLM) for multi-parts. First, the time consuming of the SLM process was analyzed and the 2.5D nesting rules for the optimization were established to reduce the time consuming. Then, the 2.5D automatic nesting was studied. A simplified method which uses the 3D projection to convert the 2.5D nesting to the 2D nesting and an algorithm for generating the projection from slice data were presented. Finally, by taking a operation model for an example, an experiment was performed on the virtual SLM system developed with OpenGL and VC++ to simulate the motion of real system and to validate the feasibility of the method. The result shows that the processing times are reduced from 4 to 3, the recoating times are from 3 892 to 2 231 and the expected processing time has been from 91 276 s to 69 918 s at a scanning speed of 600 mm/s, slicing thickness of 0.035 mm and track space of 0.08 mm. The time consuming has been significantly reduced as compared with that before optimization.

收稿日期:2011-09-30;修订日期:2011-12-15.

基金项目:2010年广东省教育部产学研结合重点项目(No. 2010A090200072);华南理工大学优秀博士学位论文创新基金资助项目

**Key words:** laser technology; Selective Laser Melting(SLM); multi-parts; processing efficiency; 2.5D nesting

## 1 引言

选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)是 20 世纪 90 年代由德国 Fraunhofer 激光技术研究所提出的一种能够直接成型金属零件的快速成型技术,理论上可获得高密度(接近 100%)与高尺寸精度( $<0.1 \text{ mm}$ )的金属零件,并且能够成型任意复杂几何形状的零件,在复杂曲面零件成型、小批量生产零件方面具有很大的优势<sup>[1-2]</sup>。国内外学者针对该技术的工艺和应用做了大量研究。在工艺方面, Yadroitsev 等<sup>[3]</sup>通过实验获得壁厚  $140 \mu\text{m}$  的薄壁件; Wu 等<sup>[4]</sup>直接成型出高致密度的铜基合金成型件;王迪等<sup>[5]</sup>采用光纤激光器,通过正交实验优化了 316L 不锈钢的成型工艺并获得高致密度零件。在应用方面,国外的 EOS 等公司采用 SLM 直接成型了冷却镶嵌件、个性化亚冠、齿轮等零件<sup>[6]</sup>;国内的华南理工大学直接成型了手术模板并成功应用于临床<sup>[7-8]</sup>,并研究了免装配机构<sup>[6]</sup>和金属浮雕的直接成型<sup>[9]</sup>。

随着 SLM 技术的日趋成熟,其应用范围会越来越广。而在实际生产中,多零件的 SLM 成型效率是一个关键问题。为此,本文以优化多零件的 SLM 成型效率为目的,分析了多零件 SLM 成型过程的时间消耗,建立了优化规则,并提出了一种优化方法。最后实验验证了优化方法的有效性。

## 2 多零件 SLM 成型过程的时间消耗

在 SLM 成型生产过程中,多零件的成型往往需要划分成多个成型任务,如图 1 所示。单个成型任务所消耗的时间由零件成型时间和成型准备时间组成。零件成型时间包括:单层实体成型时间的总和、单层铺粉时间的总和。成型准备时间主要是成型前系统的准备以及成型完成后将零件取下等工作所消耗的时间。

忽略成型过程中激光扫描路径间的空跳转,第  $i$  个成型任务所消耗的时间  $T_{f_i}$  可由如下公式

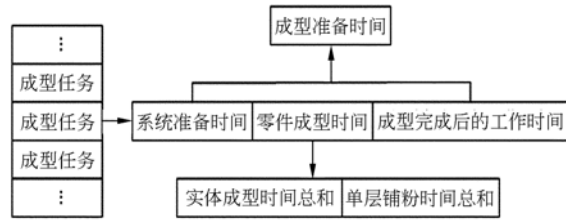


图 1 多零件选区激光熔化成型时间消耗  
Fig. 1 Time consuming of SLM for multi-parts

表示:

$$T_{f_i} = T_{ts_i} + T_{tc_i} + T_p, \quad (1)$$

$T_{ts_i}$  表示第  $i$  个成型任务中所有零件的单层实体激光扫描时间总和,仅与零件单层切片的实体面积有关; $T_{tc_i}$  表示第  $i$  个成型任务中铺粉时间总和; $T_p$  表示成型准备时间,假设为定值。其中:

$$T_{tc_i} = N_i \times T_c, \quad (2)$$

$N_i$  表示第  $i$  个成型任务中零件的最大切片层数; $T_c$  表示单层铺粉时间,为定值。

设某批零件,需要划分为  $x$  个成型任务,则所消耗时间  $T_f$  如下所示:

$$T_f = \sum_{i=1}^x T_{f_i} = \sum_{i=1}^x T_{tc_i} + \sum_{i=1}^x T_{ts_i} + \sum_{i=1}^x T_p = T_c \times \sum_{i=1}^x N_i + T_s + x \times T_p, \quad (3)$$

$T_s$  表示所有零件的单层实体激光扫描时间总和,只与零件模型有关,为定值。

从公式(3)可以看出,影响零件成型时间的因素为总铺粉时间  $T_c \times \sum_{i=1}^x N_i$  和总成型准备时间  $x \times T_p$ 。这两个时间与成型次数和每次成型任务

所选零件的最大切片层数之和  $\sum_{i=1}^x N_i$  有关。而影

响  $\sum_{i=1}^x N_i$  的因素为成型次数  $x$  和第  $i$  个成型任务中零件的最大切片层数  $N_i$ 。显然,优先选择未选零件中具有最大切片层的零件放入同次任务进行成型,能有效减小未选零件中的最大切片层数。结合减少成型次数  $x$ ,能有效减小每次成型所选零件

的最大切片层数之和  $\sum_{i=1}^x N_i$ 。

### 3 2.5 维排料优化规则

排料又称套料、下料,通常是指在一定数量的形状和尺寸给定的区域上,尽可能多地排放需要的几何图形<sup>[10]</sup>。按所涉及元素的维数,常分为2维排料和3维排料。2维排料是指在一个2维平面区域中尽可能多地排放2维图形,常用于在切割、冲裁模等加工中节约母料。3维排料是指在一个3维空间区域中尽可能多地排放3维图形,常用于在包装中提高空间的利用率。

SLM成型中,成型零件在成型空间的排放属于3维图形在3维空间区域的排放(如图2所示)。但不同于3维排料,根据SLM的工艺要求,零件必须从基板开始成型,几乎不会出现类似图3中零件B在零件A的顶部开始成型的情况。所以,SLM成型中,零件的排放也可以当作是3维零件图形在2维基板区域的排放。同时,根据工艺设计好的零件,在基板上只有3个运动自由度(如图2所示),故在2维基板面中尽可能多地排放3维零件图形,可称之为2.5维排料。

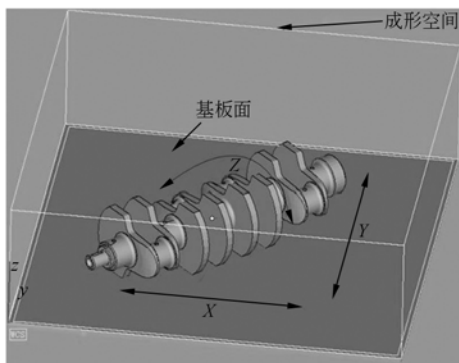


图2 零件在成型空间中的排放

Fig. 2 Arrangement of parts in forming space

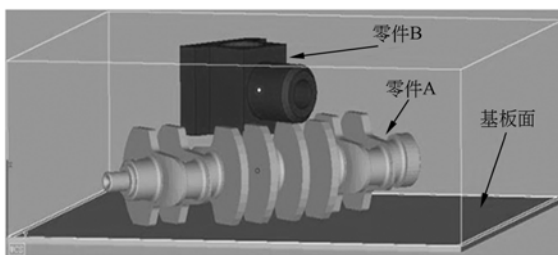


图3 SLM成型应当避免的情况

Fig. 3 Forbidden situation in SLM for arranging parts

根据第2节的分析,为减少多零件SLM成型的时间消耗,2.5维排料应遵循规则:(1)优先选取具有最大切片层厚的零件;(2)所选零件应尽可能多地排满基板面。

### 4 2.5 维自动排料

自动排料是指利用计算机通过一定的算法来代替人工进行排料。目前较成熟的自动排料算法多针对2维排料,主要有遗传算法,模拟退火算法,快速邻接搜索算法等,其中快速邻接搜索也能用于3维排料<sup>[11-13]</sup>。

#### 4.1 2.5 维自动排料的简化

2维排料时,需要对零件进行移动、旋转和“重叠”判定。2.5维排料时,对零件的移动操作类似于2维自动排料(如图2所示)。但针对零件是否“重叠”,需要沿整个零件的成型高度进行判定。自动排料时,可考虑先将3维零件图形投影到2维基板面上,然后用得到的2维图形进行排料。这样可以利用2维自动排料技术简化2.5维自动排料。

#### 4.2 2维排料中的“多边形”和“网格”模型

“多边形”和“网格”是2维排料中的两种图形表示模型<sup>[13]</sup>。“多边形”模型以三条或三条以上的线段首尾顺次连接且不相交组成图形的轮廓。“网格”模型是图形的离散(或称像素、点阵、矩阵)表示方式,它将平面划分成一定尺寸的网格,以网格的虚实来表示图形的轮廓。图4为一个2维图形的“多边形”及“网格”表示。

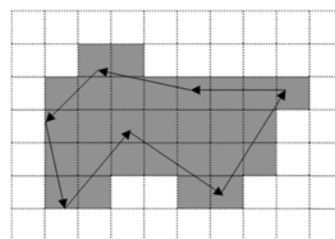


图4 2维排料中的图形表示模型

Fig. 4 Model representations in 2D nesting

显然,“多边形”模型能够转化成“网格”模型,而“网格”模型无法精确转化成“多边形”模型。为使简化方法具有通用性,本文采用“多边形”作为3维零件投影的表示模型。

### 4.3 切片外轮廓相互叠加

#### 4.3.1 原理及特点

为直接得到 2 维排料需要的“多边形”模型,本节将给出一种利用 3 维模型的切片数据相互叠加来生成投影的方法。其原理如图 5 所示,首先对零件进行切片处理,然后通过各切片层外轮廓相互叠加来得到 3 维模型在 2 维平面的投影。该方法直接利用切片数据来生成投影,具有以下特点:

(1)切片是快速成型数据处理的必经步骤,利用切片数据无须进行多余处理。

(2)切片数据中,轮廓是由闭合多义线表示的,其本身具有多边形的拓扑结构。利用 4.3.2 小节的外轮廓叠加算法,可保证生成的投影保留这种多边形拓扑结构的完整。

(3)切片数据层与层的叠加计算是独立的,可利用并行计算来加快计算速度。

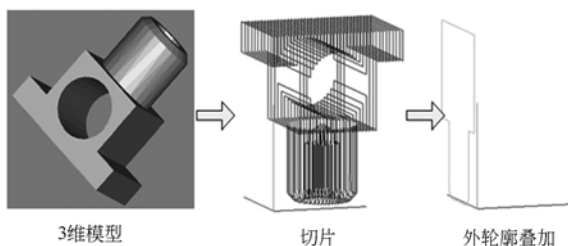


图 5 利用切片生成“多边形”投影

Fig. 5 Projection generated from slices

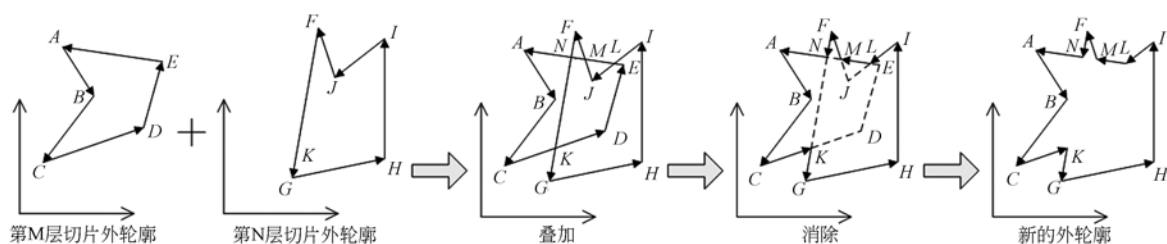


图 6 外轮廓叠加原理

Fig. 6 Composition of two external contours

遍历中,判别相交时可能会出现两种特殊情况:

(1)点重合。

如图 7 所示,遍历轮廓  $ABC\dots$  与非遍历轮廓

#### 4.3.2 外轮廓叠加算法

外轮廓叠加的原理如图 6 所示。具体算法为:以一个轮廓中不在另一轮廓内的点为起点(如图 6 中 A、C、F、G、H、I 点),沿该轮廓的方向(逆时针)遍历,若当前点与下一点组成的直线段与另一轮廓产生交点,则切换遍历轮廓,并以离当前点最近的交点为当前点开始遍历,如此反复直到回到起点。遍历经过的点组成的轮廓即为叠加形成的新轮廓。以图 6 为例进一步说明:

(1)以 C 点为起点开始遍历轮廓 ABCDE。

(2)直线 CD 与轮廓 FGHIJ 产生交点 K,从 K 点开始遍历 FGHIJ。

(3)直线段 KG、GH、HI 与轮廓 ABCDE 无交点。

(4)直线段 IJ 与轮廓 ABCDE 产生交点 L,从 L 点开始遍历 ABCDE。

(5)直线段 LA 与轮廓 FGHIJ 产生交点 M、N,从离 L 点最近的 M 点开始遍历 FGHIJ。

(6)直线段 MF 与轮廓 ABCDE 无交点。

(7)直线段 FG 与轮廓 ABCDE 产生交点 N、K,从离 F 点最近的 N 点开始遍历 ABCDE。

(8)直线段 NA、AB、BC 与轮廓 FGHIJ 无交点。

(9)回到 C 点,遍历结束。

(10)遍历经过的点组成新轮廓 CKGHILM-FNAB。

$DBE\dots$  在 B 点重合,有 3 种情况。处理算法为:以重合点(B 点)为当前点,判断非遍历轮廓的下一点(E 点)是否在遍历轮廓当前点的前点(A 点)和后点(C 点)与当前点(B 点)组成的三角区域

(ABC)内。是,则继续遍历当前轮廓(如图 7(a)所示);否,则切换遍历轮廓(如图 7(b)和图 7(c)所示)。

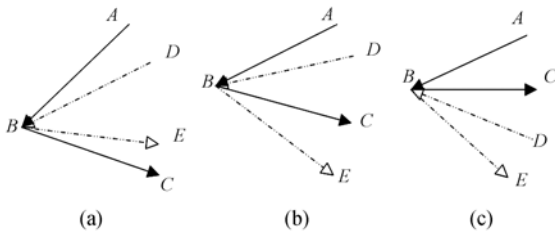


图 7 点重合的情况

Fig. 7 Superposition of points

(2)线重合。

如图 8 所示,遍历轮廓 ABCD...中的 BC 与非遍历轮廓 EFGH...中的 FG 重合,有 3 种情况。处理算法为:判断重合线是否同向,否,则切换遍历轮廓(如图 8(a)所示);是,则判断遍历轮廓重合线的长度(BC)的长度是否大于非遍历轮廓重合线的终点(G点)与遍历轮廓重合线的起点(B点)的距离。若大于,则继续遍历(如图 8(b)所示);否则切换遍历轮廓(如图 8(c)所示)。

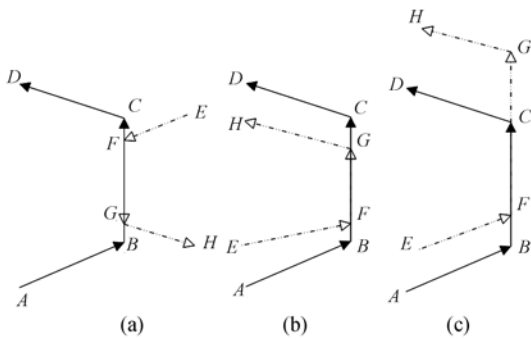


图 8 线重合的情况

Fig. 8 Superposition of lines

4.3.3 叠加的并行计算

外轮廓叠加的计算仅与参与运算的 2 个切片层有关,可考虑将叠加计算划分成多个独立的任务来并行执行。利用当前计算机的多核处理能力结合并行计算能大大减少叠加计算时间。叠加的并行算法流程为:

(1)选取切片层的前  $n$  层外轮廓数据建立  $n$  个初始数据集  $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ ;建立  $n$  个任务  $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ ,每个任务  $T_i$  对应一个初始数据集  $R_i$ 。 $n$  可根据处理器的核数来选择。令多任务

同步变量  $j = n + 1$ 。

(2)任务  $T_i$  选择第  $j$  层切片外轮廓数据进行叠加计算,并设置  $j = j + 1$ 。

(3)判断  $j$  是否超出切片的最大层  $n$ ,是,则继续;否,则转(2)。

(4)等待任务  $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$  完成计算。

(5)逐层叠加  $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$  中的数据得到最终结果。

算法中的同步变量  $j$  被一个任务访问时,不会被其它任务访问,从而确保不会出现重复计算(如一个任务还没有执行  $j = j + 1$ ,另一个任务又读取了  $j$ )或漏算(如多个任务同时执行  $j = j + 1$ )的情况。

5 优化实验与结果

5.1 实验方案

为验证所述优化方法,利用 VC++ 结合前述 2.5 维自动排料的简化算法,编程开发了自动排料优化软件。其中,简化后的二维自动排料采用文献[13]所述的快速邻接搜索算法。选用文献[8]成型的手术导板模型作为优化对象,以成型 4 套模板为目标,在虚拟 SLM 系统 VDemetal280 上进行自动优化实验。

VDemetal280 是以华南理工大学自主研发的第二代 SLM 设备 Demetal280<sup>[4-9]</sup> 为原型,利用 OpenGL 开发的虚拟实验设备。主要用于加工数据验证、成型过程演示和成型时间预测,其成型时间的预测根据下式获得:

$$T = L_s \times V_s + L_j \times V_j + T_c \times N + T_p, \quad (4)$$

其中,  $L_s$  为激光扫描路径总长,  $V_s$  为激光扫描速度,  $L_j$  为扫描线间的跳转距离总长,  $V_j$  为激光扫描线间的跳转速度,  $T_c$  为单次铺粉时间,  $N$  为铺粉次数,成型准备时间  $T_p$  根据实际经验设为 6 000 s。

5.2 实验结果

未优化前,每套模板单独成型,其模型如图 9 所示。共有 6 个零件,切片层数分别为:973,897,421,361,286 和 275。优化后,每 4 套模板仅需要成型 3 次,如图 10 所示。表 1 为优化前和优化后在 VDemetal280 上进行虚拟成型后的结果对比。虚拟成型时所用的工艺参数为扫描速度 600 mm/s、切片层厚 0.035 mm、扫描间距 0.08 mm。



图 9 优化前 1 套手术模板的模型

Fig. 9 Models of one set surgical guide before optimization

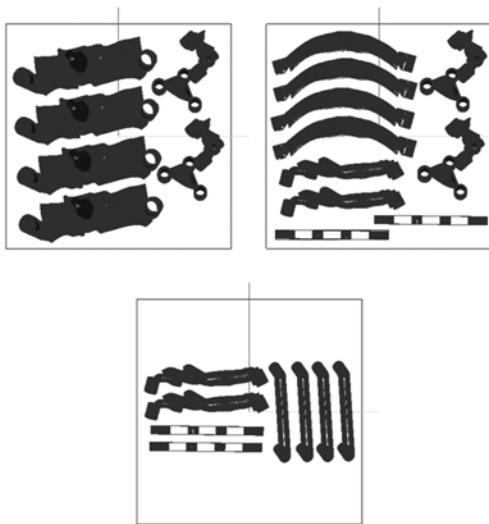


图 10 优化后 4 套手术模板的模型

Fig. 10 Models of four sets of surgical guides after optimization

表 1 优化前与优化后的对比

Tab. 1 Comparison of results before and after optimizations

成型实验	成型次数	总铺粉次数	时间消耗/s
优化前	4	3 892	91 276
优化后	3	2 231	69 918

## 6 结 论

本文针对 SLM 在实际生产中的效率优化问题,首先,分析了多零件选区激光熔化成型过程的时间消耗,发现减少成型次数和单次成型任务中零件的最大切片层数能有效减少时间消耗,并以此为目标建立了 3 维零件在 3 维成型空间中的 2.5 维排料优化规则。然后,研究了 2.5 维自动排料,提出利用 3 维零件模型在 2 维平面区域的投影将 2.5 维排料转化为 2 维排料的简化方法,并研究了一种利用切片数据进行投影生成的算法。该算法直接利用切片数据,生成的投影能够保留用于 2 维排料的“多边形”拓扑结构,还能利用并行计算加快投影生成速度。最后,为验证所述方法的有效性,以手术模板模型为例,在虚拟选区激光熔化系统 VDemetal280 上进行了优化实验。结果表明:与优化前相比,优化后的成型次数从 4 次降为 3 次,在 600 mm/s 扫描速度、0.035 mm 切片层厚、0.08 mm 扫描间距的工艺参数下,总铺粉次数降为 2 231 次,预计加工时间降为 69 918 s,时间消耗明显减少。由此说明,基于 2.5 维排料的多零件 SLM 成型效率的优化方法有效。

## 参考文献:

- [1] OVER C, MEINERS W, WISSENBACK K, *et al.*. Selective laser melting: a new approach for the direct manufacturing of metal parts and tools [R]. 1st International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering, Germany: Frankfurt, 2001.
- [2] ABE F, OSAKADA K, SHIOMI M, *et al.*. The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting [J]. *Materials Processing Technology*, 2001, 111(1/3): 210-213.
- [3] YADROITSEV I, BERTRAND P H, SMUROV I. Parametric analysis of the selective laser melting process [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, 253(19): 8064-8069.
- [4] WU W H, YANG Y Q, HUANG Y L. Direct manufacturing of Cu-based alloy parts by selective laser melting [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, 5(1): 37-40.
- [5] 王迪, 杨永强, 吴伟辉. 光纤激光选区激光熔化 316L 不锈钢工艺优化[J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3233-3239.

WANG D, YANG Y Q, WU W H. Process optimization for 316L stainless steel by fiber laser selective melting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, 36(12):

- 3233-3239. (in Chinese)
- [6] 苏旭彬,杨永强,王迪,等. 免装配机构的选区激光熔化直接成型工艺研究[J]. 中国激光,2011,38(6):0603021.  
SU X B, YANG Y Q, WANG D, *et al.*. Study on process of non-assembly mechanisms directly fabricated by selective laser melting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011,38(6):0603021. (in Chinese)
- [7] 吴伟辉,杨永强,何兴容,等. 金属质个性化手术模板的全数字化快速设计及制造[J]. 光学精密工程,2010,18(5):1135-1143.  
WU W H, YANG Y Q, HE X R, *et al.*. All-digital rapid design and manufacture of metal customized surgical guide plate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(5):1135-1143. (in Chinese)
- [8] 何兴容,杨永强,吴伟辉,等. 粉碎性骨折个性化手术模板的选区激光熔化直接成型研究[J]. 生物医学工程学杂志,2010,27(3):519-523.  
HE X R, YANG Y Q, WU W H, *et al.*. Research on direct forming of comminuted fracture surgery orienting model by selective laser melting[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2010,27(3):519-523. (in Chinese)
- [9] 刘杰,杨永强,宋长辉. 基于 SLM 从图像直接制造金属浮雕的方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2011,39(6):13-17.  
LIU J, YANG Y Q, SONG CH H. SLM-based direct manufacturing of metal bas-relief from images [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 39(6):13-17. (in Chinese)
- [10] 张英杰. 二维计算机排料与数控自动编程[D]. 北京:华北电力大学,2004.  
ZHANG Y J. *Two-dimensional packing and auto-programming for NC* [D]. Beijing:North China Electric Power University, 2004. (in Chinese)
- [11] BADU R A, BADU N R. A generic approach for nesting of 2-D parts in 2-D sheets using genetic and heuristic algorithms [J]. *Computer-aided Design*, 2001,33:879-891.
- [12] HECKMANN R, LENGAUER T. A simulated annealing approach to the nesting problem in the textile manufacturing industry [J]. *Annals of Operations Research*, 1995, 57:103-133.
- [13] EGEBLAD J, NIELSEN B K, ODGAARD A. Fast neighborhood search for two- and three-dimensional nesting problems [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007,183:1249-1266.

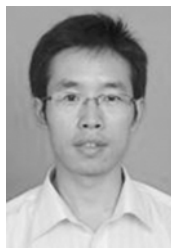
#### 作者简介:



刘杰(1983—),男,陕西勉县人,博士研究生,2005年、2009年于湘潭大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光加工与激光快速成型方面的研究。E-mail: jie.liu.scut@gmail.com



苏旭彬(1981—),男,广东潮州人,博士后,2005年、2008年于中南大学分别获得学士、硕士学位,2011年于华南理工大学获得博士学位,主要从事激光加工与快速成型方面的研究。E-mail: scutsxb@yahoo.com.cn



肖冬明(1980—),男,湖南宁乡人,讲师,博士研究生,2003年、2008年于湖南科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光加工与激光快速成型方面的研究。E-mail: dominic741@163.com

#### 导师简介:



杨永强(1961—),男,河北定州人,教授,博士生导师,1982年、1987年、1993年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事激光加工、快速原型以及金属材料等方面的研究。E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn