

激光选区熔化中分区薄壁支撑自动生成技术*

闫利强¹, 孟月梅^{1,2,3}, 侯志霞^{1,2,3}

- (1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;
2. 数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024;
3. 复杂构件数控加工工艺及装备北京市重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 激光选区熔化工艺中,合理的支撑结构对于保证零件成形质量有重要作用,其中薄壁支撑是应用最广的一种支撑结构类型。通过分析薄壁支撑结构的工艺要素,简述基于 STL 模型的薄壁网格支撑结构自动生成流程,提出了分区的薄壁支撑结构自动生成方法,并开发了相应的软件工具。通过生成多个零件的薄壁分区支撑结构,验证了该方法的可行性。

关键词: 增材制造;激光选区熔化;STL 模型;薄壁支撑;分区

Automatic Generation Technology of Thin-Walled Support Based on Separate Area in Selective Laser Melting

YAN Liqiang¹, MENG Yuemei^{1,2,3}, HOU Zhixia^{1,2,3}

- (1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
2. Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technology, Beijing 100024, China;
3. Beijing Key Laboratory for NC Machining Technology and Equipment of Complex Component, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The reasonable supporting structure plays an important role in ensuring the forming quality of the parts in the selective laser melting process. The Thin-walled support is the most widely used type of the supporting structure. By analyzing the process elements of thin-walled support structure and describing the automatic generation process of thin-walled grid support structure based on STL model, the algorithm of automatic generation of thin-walled support structure of separate area is proposed and the corresponding software functions are developed. The feasibility of the implementation method is verified by generating the thin-walled partition support structures for parts.

Keywords: Additive manufacturing; Selective laser melting (SLM); STL model; Thin-wall support; Separate area

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.21.094

增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术是一种新兴的制造技术。该技术采用离散—叠加原理,通过逐层堆积生成三维实体,省去传统制造中的诸多环节,使生产效率得到较大提高,既能够节省材料,又可以降低零件制造成本^[1]。目前已有的增材制造工艺大致可以分为以下几类:光固化成型(SLA)、选区激光烧结(SLS)、熔融沉积成型(FDM)、激光熔化沉积(LMD)和激光选区熔化(SLM)^[2]等。其中,激光选区熔化成型方法通过使用高功率的激光作为能量源^[3],按照预定的扫描路径,逐层熔化铺覆好的金属粉末,形成满足设计要求的零件。该方法能够直接成形较高精度的复杂金

* 基金项目:工信部民用飞机专项科研项目(MJZ-2016-G-59)。

属零件,在航空航天领域有显著应用成效^[4]。

利用激光选区熔化工艺加工复杂结构零件时,如不添加合理的支撑结构,成形过程中容易发生塌陷或变形,严重影响零件精度。因此,合理添加支撑结构直接决定了零件的制造精度和性能^[5]。

目前,国外在支撑自动生成技术方面较为成熟,已进入商业化应用阶段。如美国 3DSystems 公司、日本 CEMT 公司以及比利时 Materilise 公司等,均已开发出成熟的商用支撑设计软件^[6]。由 Materilise 公司开发的 Magics 软件支撑构建功能较为齐全,处理效率高,在行业内备受关注。特别对于块状薄壁支撑结构的创建,用户可根据需求生成不同结构类型,提供的分割选项可以

将整体薄壁网格支撑按切割长度与间隙宽度分成多个块状支撑,实现了薄壁支撑的分区。

国内在该领域针对薄壁支撑的相关研究也逐渐增多,但是和国外相比仍存在一定的差距。卞宏友等^[7]提出了基于分析垂直截面轮廓内待支撑边生成支撑多边形的算法,可以准确的生成薄壁网格支撑;沈威等^[8]提出了基于待支撑区域薄壁网格支撑结构设计算法;王彦云等^[9]针对FDM成型工艺提出了间隔型薄壁支撑结构自动生成算法。目前国内对激光选区熔化中薄壁支撑自动生成的研究主要集中在薄壁网格结构的自动生成算法方面,而对于薄壁支撑分区的相关研究较少。

在激光选区熔化成形工艺中,薄壁网格支撑具有成形速度快、结构简单、可有效减少零件翘曲变形等特点,被广泛应用。但此类支撑也有其局限性,当支撑区域面积较大时,后期去除难度增加,影响零件表面精度。

本文对薄壁网格工艺支撑结构自动生成方法进行研究。目前,支撑结构自动生成算法主要有基于层片轮廓布尔运算和基于STL模型构造两种。一种通过相邻层轮廓之间的比较确定支撑区域,会出现多余支撑;另一种则通过STL模型识别零件的待支撑区域,准确添加支撑结构,是支撑自动生成的重点研究方向^[8]。本文研究基于STL模型的分区薄壁支撑结构自动生成方法,并在满足支撑强度和稳定性要求的前提下,按照预设的分区约束条件,将支撑区域按给定条件进行分区,形成多个子区域,生成的分区支撑结构空间布局更加合理,有利于后期支撑结构的去除,提高零件成形质量。

1 支撑工艺要素分析

在激光选区熔化成形过程中,对于带有悬空结构的零件,为确保其制造精度,必须构建具备一定强度的支撑。而支撑仅在零件成形过程中起到辅助支撑作用,后期仍需去除,因此在零件成形过程中应尽可能减少支撑的使用。根据激光选区熔化成型工艺特点,支撑应当满足以下3个要求^[2]:

(1) 支撑应具备足够的稳定性和强度,保证零件的成型质量;

(2) 在满足稳定性和强度要求的情况下,支撑应当尽量节省材料;

(3) 支撑应当便于后期去除,同时需保证去除支撑后的零件表面光洁。

目前典型的支撑结构包括实体、柱状、薄壁网格状、树状等多种支撑类型^[10]。不同的成形工艺、材料与零件结构等,所采用的支撑结构类型有所不同。支撑结构设计,就是在综合考虑零件结构、成形工艺方法、材料、制造精度与效率等各类因素的基础上,选用适当的支撑

类型与构造参数,使所设计支撑能够满足零件制造质量高、成本低、效率高等要求。

2 薄壁支撑自动生成流程

薄壁支撑自动生成流程如下:首先,根据给定待支撑角度获取零件模型中所有要支撑的三角片,进而确定待支撑区域,并提取区域轮廓;其次,确定每个待支撑区域在XOY平面内的投影区域,建立各自的包围矩形,根据网格间距确定支撑基准线,并在此基础上根据每个支撑区域投影轮廓及支撑基准线的位置确定其支撑网格线;最后,按照每个支撑区域对应的支撑网格线、区域轮廓与其三角片,生成各个支撑区域的轮廓支撑和网格支撑三角片,实现薄壁支撑结构的构建。其生成流程如图1所示。

2.1 确定待支撑区域

在零件STL模型中,三角片法向指向零件外部。通过对零件STL模型中三角片法向量进行分析,找出零件中需要添加支撑的3种特征,分别为待支撑面、待支撑边、待支撑点^[7],如图2所示。待支撑点和待支撑边的支撑设计简单,已有成熟的支撑自动生成方法,本文主要针对待支撑面的薄壁支撑结构进行研究。

待支撑面包括悬吊面、加工基底面以及大倾角斜斜面。因此,当三角片法向与Z轴夹角大于指定值时,可判定该三角片在待支撑区域内。而待支撑区域一般由多个相关联的待支撑三角片集合构成,且一个零件中可能存在多个互不相关的待支撑区域,需要依次获取所有待支撑区域三角片和区域轮廓。

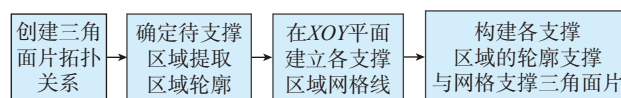


图1 薄壁支撑结构自动生成流程

Fig.1 Automatic generation process of thin-wall support structure

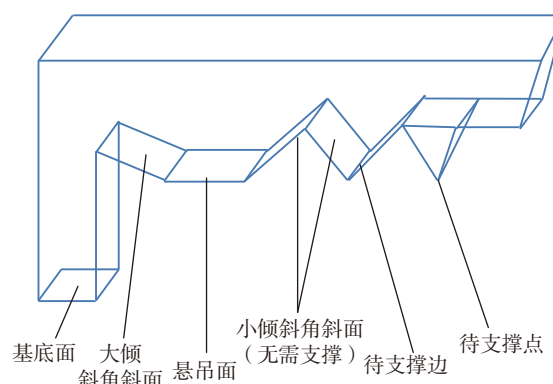


图2 待支撑区域示意

Fig.2 Schematic diagram of the support area

2.2 支撑网格线建立

通过给定支撑网格分布方向及支撑间距,对待支撑区域在 XOY 平面内的投影轮廓进行网格划分。

首先,根据待支撑区域轮廓,获取其在 XOY 平面内的投影。对于每个待支撑区域,必定存在唯一外轮廓,但可能存在多条内轮廓,如图 3 (a) 中只存在一条内轮廓,图 3 (b) 中存在多条内轮廓。

其次,根据投影区域外轮廓、网格分布方向及支撑网格间隔,确定外轮廓对应的包围矩形,建立网格基准线,并分别计算网格基准线和投影内外轮廓的交点,获得支撑结构的投影网格线。图 4 为基于图 3 (a) 获得的投影网格线示意图。支撑网格的间隔参数越小,薄壁支撑结构就会越密集,支撑稳定性越好,但是消耗材料会增加,成形所需时间增长,后期支撑结构去除难度也相应增加。

2.3 网格支撑结构三角片构建

在获得支撑投影网格线的基础上,针对每条网格线段,建立垂直于 XOY 平面且过该网格线的平面,计算该平面与当前待支撑区域三角片的交线。通过投影网格线和获得的交线构建当前网格线的支撑三角片。利用该方法,可构建所有待支撑区域的网格支撑三角片。

3 薄壁分区支撑自动生成方法

薄壁分区支撑结构是将 1 个待支撑区域划分为多个子区域而构建的支撑结构,通过对支撑区域进行分区,使生成的支撑后期便于去除,提高零件的表面精度。通过对以上薄壁网格生成流程进行改进,按多个子区域进行支撑设计,进而构建分区网格支撑。同时,对所生成支撑结构与零件的干涉情况进行特殊处理。

3.1 支撑区域轮廓的加固处理

激光选区熔化成形过程中,轮廓支撑与加工基板接触部位的残余应力较大,容易脱离基板,发生翘曲变形^[1],且随着轮廓支撑高度的增加,其稳定性和强度逐渐变差,容易因外力作用发生偏移甚至断裂,影响成形精度^[6]。为保证薄壁支撑具有足够的稳定性和强度,确保加工过程中支撑与加工基板紧密相连,防止支撑发生位移,应对支撑区域轮廓进行加固处理。

轮廓支撑的加固处理有两种:一种是在轮廓支撑外侧添加高度较低的偏置支撑,在支撑与基板接触处形成过渡区域,可提高轮廓支撑与加工基板的连接强度,见图 5 (a);另一种是在轮廓支撑内侧添加等高的偏置支撑,增加原有轮廓支撑壁厚,使支撑横截面积增大,从而达到提高支撑刚度与强度的目的,如图 5 (b) 所示。两种方法可以同时使用,能够对轮廓支撑起到加固作用,避免其偏移或变形,保证支撑的稳定性。在掌握支撑材

料结构参数的前提下,可以采用有限元方法进行支撑加固方案的仿真和评估。

3.2 分区支撑投影网格建立

分区支撑投影网格建立流程如下:按照支撑分布方向,建立分区轮廓的包围矩形;根据支撑网格间距、分区

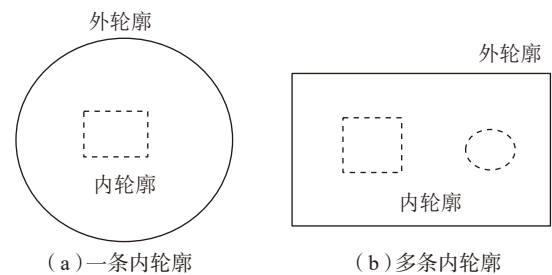


图3 投影区域轮廓示意
Fig.3 Outline diagram of projected area

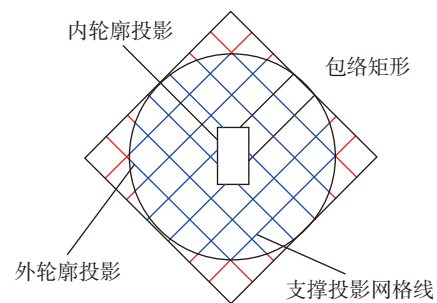
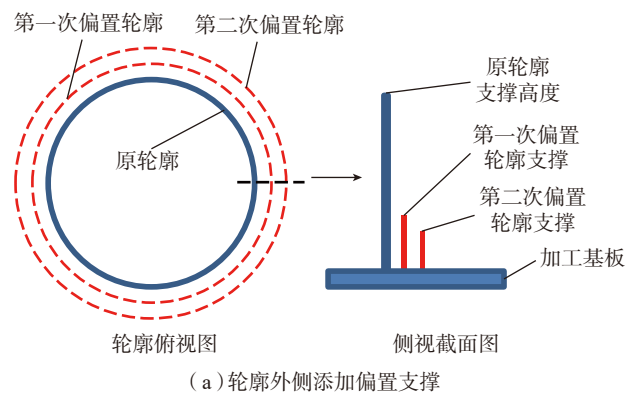
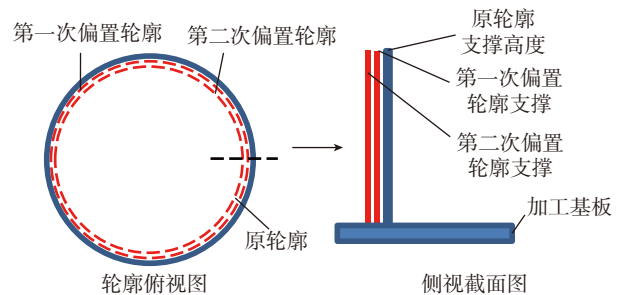


图4 支撑投影网格示意
Fig.4 Diagram of support projection grid



(a) 轮廓外侧添加偏置支撑



(b) 轮廓内侧添加偏置支撑

图5 轮廓支撑加固处理示意

Fig.5 Diagram of contour support reinforcement treatment

间距等参数,对包络矩形进行区域划分,生成分区基准线及支撑网格基准线,分别与分区轮廓进行求交,即可获得分区支撑网格。通常情况下,分区间隔不大于支撑网格间距,分区大小为支撑网格间距的5~10倍。实际加工时,通过对不同参数组合进行多次工艺试验,确定支撑的最优参数,如图6(a)所示。为支撑后期去除方便,对支撑区域投影分区完成后,亦可对支撑区域投影偏置轮廓进行分区,利用轮廓和各分区基准线的相交关系,对轮廓进行分区截取,生成图6(b)的轮廓分区结果。当分区面积太小,无法起到支撑作用时,可以将该区域与相邻区域合并,以增加支撑的稳定性与强度。

3.3 分区支撑结构构建

利用分区支撑投影网格与待支撑区域,通过确定支撑结构的上下边缘线,构建分区支撑结构的三角片。

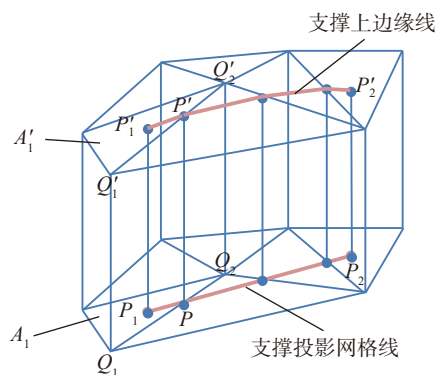
首先确定支撑结构的上边缘线。支撑结构上边缘线由零件待支撑区域的位置确定。将网格线沿Z轴向对应待支撑区域进行投影,在待支撑区域内得到的投影线即为当前网格线对应的薄壁支撑的上边缘线。支撑结构上边缘线示意如图7(a)所示,其计算流程如图7(b)所示。

图7(a)中, A_1 、 A'_1 分别为投影三角片和支撑区域三角片, P_1P_2 为投影网格线。首先计算投影三角面片 P_1P_2 和 Q_1Q_2 的交点 P , 然后运用公式(1)获得参数 t 。利用公式(2)计算上边缘线上 P' 点的坐标。

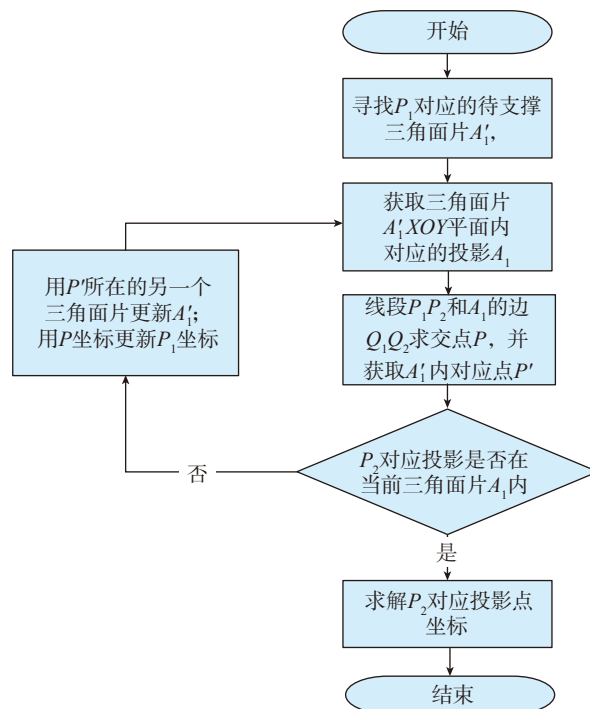
$$\begin{cases} t=(P-Q_1)/(Q_2-Q_1) & (1) \\ P'=Q'_1+(Q'_2-Q'_1)t & (2) \end{cases}$$

在获得分区支撑结构上边缘线后,可初步确定当前待支撑区域的分区支撑三角片。分区支撑的下边缘线为 XOY 平面内对应网格线,根据上边缘折线上的点在支撑投影网格线上生成相应节点,构建如图8所示薄壁支撑三角片。

对于复杂零件结构,如上生成的薄壁支撑结构可能与零件发生干涉,生成多余的支撑,故需要对图8中已



(a) 支撑结构上边缘线示意



(b) 支撑结构上边缘线生成算法

图7 支撑结构上边缘线生成算法及示意

Fig.7 Generation algorithm and schematic of upper edge line of support structure

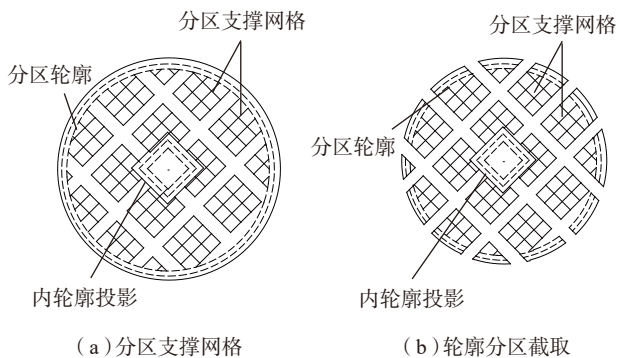


图6 分区支撑投影网格

Fig.6 Diagram of partition support projection grid

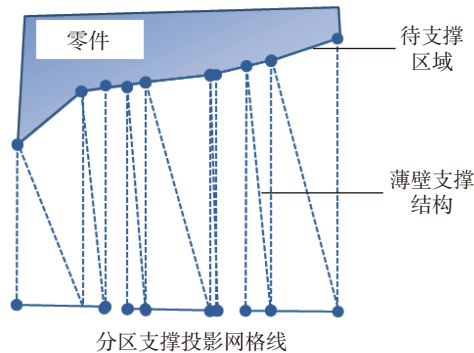


图8 分区支撑三角片示意

Fig.8 Diagram of partition support triangle

生成的支撑三角片进一步处理。

与零件发生干涉的支撑三角片应满足两个条件:(1)零件三角片法向量与Z轴夹角为锐角或0;(2)零件三角片与支撑三角片相交。首先筛选零件中满足以上条件的三角片,获得与支撑结构相干涉的区域。计算干涉区域三角片与支撑三角片的交线,根据该交线对现有三角片进行调整,重新构建支撑结构的三角片,如图9所示。

3.4 分区支撑与垂直侧壁干涉处理

垂直侧壁指零件模型垂直于XOY平面的面,见图

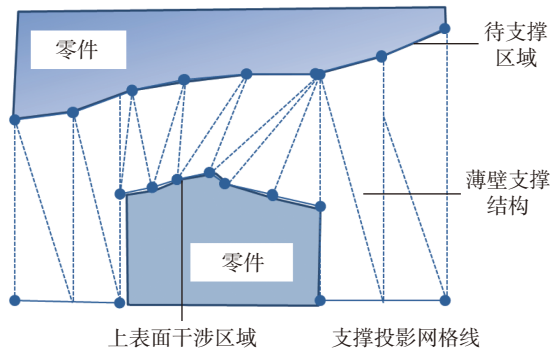
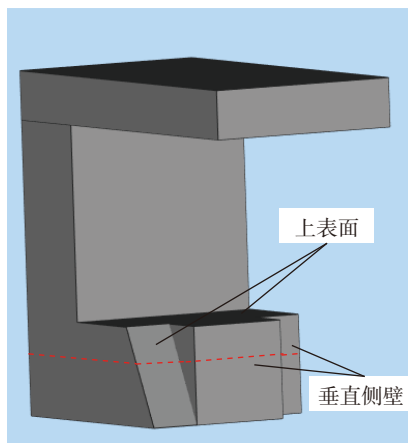
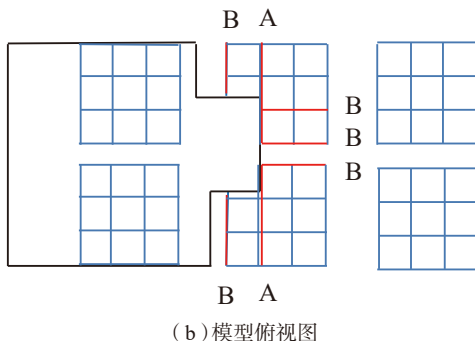


图9 干涉薄壁支撑调整示意

Fig.9 Diagram of interference thin-wall support adjustment



(a) 示例模型



(b) 模型俯视图

图10 示例模型及模型俯视图

Fig.10 Example model and top view of the model

10(a)。通过对分区支撑结构三角片边界进行调整,避免支撑与零件垂直侧壁相互接触或粘连,确保零件表面精度。

对薄壁支撑结构和零件垂直侧壁发生干涉的情况有两种:

(1)薄壁分区网格支撑结构与垂直侧壁部分重合,如图10(b)中A类情况;

(2)薄壁分区支撑与零件上表面和垂直侧壁同时发生干涉,如图10(b)中B类情况。

采用图10(a)所示模型对支撑与零件发生干涉时的接触情况进行说明,图10(b)为图10(a)中红线位置对应的剖视图。

图10(b)中A类分区网格支撑与垂直侧壁部分重合。该情况下,薄壁支撑结构将直接贴附于零件垂直侧壁,影响零件的表面精度。通过对当前网格基准线向远离垂直侧壁方向平移指定距离,使支撑结构与垂直侧壁保持距离,避免相互接触。

图10(b)中B类分区网格支撑与垂直侧壁相交。为避免支撑与垂直侧壁的接触,需要对该交点处支撑结构三角片进行调整。调整后的支撑结构三角片见图11。

4 软件开发与验证

针对以上提出的分区薄壁支撑自动生成方法,利用VS2010和OpenGL工具开发了相应的软件工具,主要功能包括STL模型读取、待支撑区域提取、分区投影网格生成、分区支撑结构STL模型构建等。该软件工具数据流程如图12所示。

利用上述软件工具,对给定STL零件模型,由用户输入待支撑角度、支撑分布方向、支撑网格间距及支撑分区参数等,即可准确识别待支撑区域,建立合理的分区网格并构建分区支撑结构STL模型。本文采用图13所示的弯管及加工试棒模型,生成薄壁分区支撑,验证

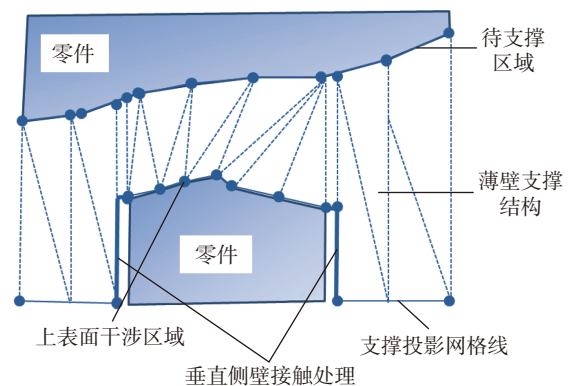


图11 垂直侧壁接触处理示意

Fig.11 Diagram of vertical sidewall contact processing

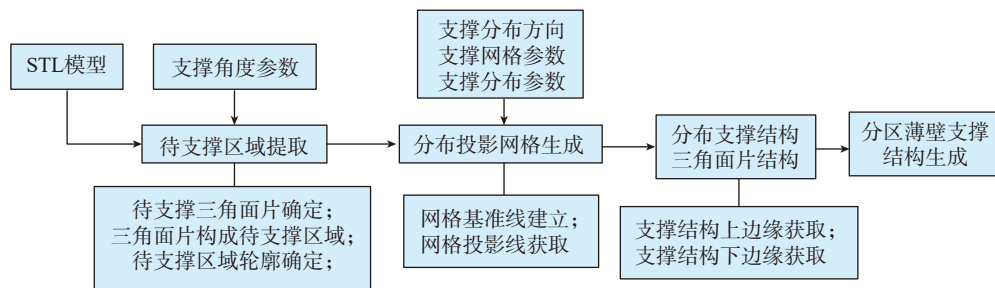
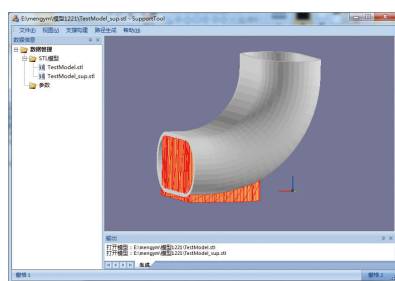
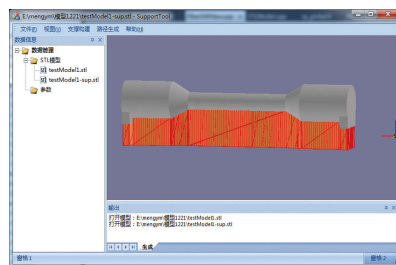


图12 软件工具数据流程

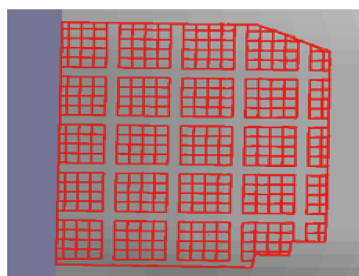
Fig.12 Flow chart of software tool data



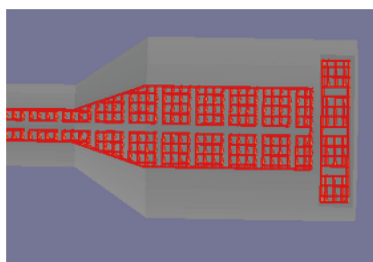
(a) 软件界面及弯管模型支撑整体视图



(b) 软件界面及加工试棒支撑整体视图



(c) 弯管部分分区支撑结构俯视图



(d) 加工试棒部分分区支撑结构俯视图

图13 薄壁分区支撑示意

Fig.13 Diagram of thin-wall partition support

了分区薄壁支撑生成方法的可行性。图 13 (a)、(b) 为软件界面及零件-支撑整体视图,图 13 (c)、(d) 为两模型部分支撑结构的俯视图。

5 结论

针对薄壁网格支撑结构中,待支撑区域面积较大时后期支撑结构去除难度大的问题,提出了基于 STL 模型的分区薄壁支撑结构自动生成方法,对所生成支撑与零件存在的干涉情况进行了分析,并提出了相应的解决方法。验证结果表明,利用该方法添加的分区薄壁网格支撑结构准确,方法正确可行。

参考文献

- [1] 杨强, 鲁中良, 黄福享, 等. 激光增材制造技术的研究现状和发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016, 59(12): 26-31.
YANG Qiang, LU Zhongliang, HUANG Fuxiang, et al. Research on status and development trend of laser additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(12): 26-31.
- [2] 曹冉冉, 李强, 钱波. SLM 快速成型中的支撑结构设计研究[J]. 机械研究与应用, 2015(3): 69-71, 76.
CAO Ranran, LI Qiang, QIAN Bo. Design of support structure in SLM rapid prototyping[J]. Mechanical Research & Application, 2015(3): 69-71, 76.
- [3] 杨永强, 王迪, 吴伟辉. 金属零件选区激光熔化直接成型技术研究进展[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 2-4
YANG Yongqiang, WANG Di, WU Weihui. Research progress of direct manufacturing of metal parts by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 2-4.
- [4] 顾冬冬, 沈以赴. 基于选区激光融化的金属材料零件快速成型现状与技术展望[J]. 航空制造技术, 2012, 55(8): 32-37.
GU Dongdong, SHEN Yifu. Research status and technical prospect of rapid manufacturing of metallic part by selective laser melting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(8): 32-37.

32-37.

[5] 张国庆, 杨永强, 张自勉. 激光选区熔化成型零件支撑结构优化设计[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 2-8.

ZHANG Guoqing, YANG Yongqiang, ZHANG Zimian. Optimal design of support structures in selective laser melting of parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 2-8.

[6] 陈少文. 选区激光熔化技术中零件支撑自动生成算法及实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

CHEN Shaowen. Automatic generation algorithm and implementation of support structures in selective laser melting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016.

[7] 卞宏友, 刘伟军, 王天然, 等. 基于 STL 模型垂直切片的支撑自动生成算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(2): 212-215.

BIAN Hongyou, LIU Weijun, WANG Tianran, et al. Support generation algorithm based on the vertical slice of STL model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(2): 212-215.

[8] 沈威, 陶孟仑, 李立杰, 等. 快速成型支撑结构设计的算法研究[J]. 武汉: 武汉理工大学学报, 2014, 36(6): 63-68.

SHEN Wei, TAO Menglun, LI Lijie, et al. Study on algorithm of support generation in rapid prototyping[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(6): 63-68.

[9] 王彦云, 陈鸿, 谢明师, 等. FDM 快速成型支撑结构自动生成算法的研究[J]. 电子技术应用, 2015, 41(8): 146-148.

WANG Yanyun, CHEN Hong, XIE Mingshi, et al. Research on algorithm of the automatic support generation for FDM rapid prototyping[J]. Application of Electronic Technique, 2015, 41(8): 146-148.

[10] 李东方. 基于激光选区熔化成型的支撑结构优化及工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.

LI Dongfang. Optimization of support structure and technology research based on selective laser melting[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.

[11] 张凯, 刘婷婷, 张长东, 等. 基于熔池数据分析的激光选区熔化成形件翘曲变形行为研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 135-141.

ZHANG Kai, LIU Tingting, ZHANG Changdong, et al. Study on deformation behavior in selective laser melting based on the analysis of the melt pool data[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 135-141.

通讯作者: 孟月梅, 研究员级高工, 研究方向为计算机辅助软件研究与开发, E-mail: meng625_105@163.com.

(责编 知舟)

(上接第78页)

[18] 姜贯涛, 孙建科, 杨学东, 等. 铝和钼对铸造钛合金铸造性能的影响[J]. 铸造, 2003, 52(12): 1163-1165.

LOU Guantao, SUN Jianke, YANG Xuedong, et al. Effects of Al and Mo content on castability of cast titanium alloys[J]. Foundry, 2003, 52(12): 1163-1165.

[19] 田孝道, 罗格里克·格斯里. 液态金属的物理性能[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

TAKAIMCHI L D, Guthrie T I L. The physical properties of liquid metals[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[20] 张永刚. 金属间化合物结构材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

ZHANG Yonggang. Structural intermetallics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.

通讯作者: 南海, 研究员, 研究方向为航空航天、兵器等领域的钛合金、钛铬合金精密成形技术, E-mail: nanhai531@yahoo.com.

(责编 一元)

(上接第93页)

[20] YAN L, YUAN S, LIU Q. Influence of minimum quantity lubrication parameters on tool wear and surface roughness in milling of forged steel[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(3): 419-429.

[21] ALJUWAYHEL N F, NELLIS G F, KLEIN S A. Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(3): 442-450.

[22] 陈日耀. 金属切削原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 57-59.

CHEN Riyao. The theory of metal cutting[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 57-59.

[23] GUPTA K, LAUBSCHER R F. Sustainable machining of titanium alloys: a critical review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(14): 2543-2560.

[24] SUN S, BRANDT M, DARGUSCH M S. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(7-8): 561-568.

[25] 中山一雄. 金属切削加工理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985: 137-138.

NAKAYAMA K. The theory of metal machining[M]. Beijing: China Machine Press, 1985: 137-138.

通讯作者: 袁松梅, 教授, 博士生导师, 研究领域为先进制造, E-mail: yuansm@buaa.edu.cn.

(责编 知舟)