

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.03.008

## 砂型增材制造多轮廓自适应切片算法

任洪稳<sup>1</sup>, 单忠德<sup>1</sup>, 杨浩秦<sup>1</sup>, 闫丹丹<sup>1</sup>, 孙玉成<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106;

2. 潍柴动力股份有限公司, 潍坊 261021)

**摘要:** 为进一步实现砂型 3D 打印高效率和高精度成形, 开展砂型输出立体光刻 (Stereolithography, STL) 模型法向量和单位化预处理研究, 提取复杂结构多轮廓砂型内部轮廓, 提出砂型 3D 打印每层三角面片单位法向量  $|Z|$  最大值的自适应分层厚度准则, 实现兼顾沿打印方向和水平方向不同曲率轮廓 STL 模型高精度分层, 最后基于 MATLAB 开发平台编写砂型多轮廓自适应测试程序, 对复杂泵壳砂型/砂芯 STL 模型进行切片测试。实验结果表明, 采用自适应切片算法可以显著提高砂型打印成形精度的同时提高成形效率, 对砂型 3D 打印具有重要理论价值和工程意义。

**关键词:** 砂型 3D 打印; 内外轮廓分型; 自适应切片算法; STL 模型

**中图分类号:** TG234.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)03-0447-10

## Multi-contour Adaptive Slicing Algorithm for Sand Mold Additive Manufacturing

REN Hongwen<sup>1</sup>, SHAN Zhongde<sup>1</sup>, YANG Haoqin<sup>1</sup>, YAN Dandan<sup>1</sup>, SUN Yucheng<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261021, China)

**Abstract:** In order to further achieve high efficiency and high precision forming of sand 3D printing, the study investigates on normal vector and unitisation preprocessing of sand stereolithography (STL) model, extract the internal contour of multi-contour sand model of complex structure, and put forward the adaptive layering thickness criterion of the unit normal vector  $|Z|$  maximum of triangular faceted slice in each layer of sand 3D printing, so as to achieve the high-precision layering of the STL model taking into account of different curvature profiles in both the printing direction and the horizontal direction. Finally, based on the MATLAB development platform, we write a multi-profile adaptive test program for sand model, and carry out the slicing test on the complex pump casing sand/core STL model. The experimental results show that the adaptive slicing algorithm can significantly improve the forming accuracy of the sand printing and forming efficiency at the same time. The study has great theoretical value and engineering significance for sand 3D printing.

**Key words:** sand mold 3D printing; internal and external contour typing; adaptive slice algorithm; stereolithography (STL) model

**基金项目:** 国家重点研发计划 (2021YFB3401200); 江苏省基础研究计划 (自然科学基金) 青年基金 (BK20230885); 装备预研专用技术项目 (30104040302)。

**收稿日期:** 2023-10-26; **修订日期:** 2024-01-18

**通信作者:** 单忠德, 男, 中国工程院院士, E-mail: shanzd@nuaa.edu.cn; 杨浩秦, 男, 博士, E-mail: yang-haoqin@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 任洪稳, 单忠德, 杨浩秦, 等. 砂型增材制造多轮廓自适应切片算法 [J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(3): 447-456. REN Hongwen, SHAN Zhongde, YANG Haoqin, et al. Multi-contour adaptive slicing algorithm for sand mold additive manufacturing [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(3): 447-456.

随着高端装备制造业关键零部件朝大型化、复杂化和结构功能一体化发展,航空航天大型薄壁件和发动机壳体铸造成形对铸件质量要求越来越高,相应的铸造工艺和砂型3D打印设备的精度和效率要求也越来越高。目前基于喷墨打印的砂型成形技术处于持续优化阶段,打印效率较低和成形砂型表面质量差是急需解决的关键问题<sup>[1]</sup>。

砂型3D打印工艺的原理是在三维CAD模型中,根据复杂铸件铸造工艺需求,设计浇注和冒口系统,直接将零件模型转换为壳型。整体砂型设计完成后,输出立体光刻(Stereolithography, STL)格式文件,再将砂型/芯的STL模型分别导入切片系统中,根据尺寸精度和砂型性能要求,确定分层厚度,然后采用砂型打印设备进行砂型打印与后处理工作。其中STL切片系统的设计与优化是整个砂型3D打印过程中的关键环节,也是影响砂型成形效率与精度的主要因素,分层厚度越大,模型表面越粗糙,台阶效应更明显;分层厚度越小,模型表面越光滑,但成形时间更长<sup>[2]</sup>。

在砂型3D打印设备上,由于等厚分层切片方式原理简单,运行稳定,在各砂型3D打印设备上已经成熟应用,目前亟须突破砂型自适应切片难题,南京航空航天大学绿色智能制造装备团队提出砂型3D打印多轮廓自适应分层成形方法,自适应分层算法相较于等厚分层算法,能够平衡砂型3D打印的成形精度与成形时间,是砂型3D打印研究领域的前沿与热点<sup>[3]</sup>。

自适应分层是在模型曲率变化较大和打印倾角较小的部分采用小层厚分层进行打印,其余部分采用大层厚分层进行打印<sup>[4]</sup>。该分层方式有效平衡模型成形时间与台阶效应导致的成形精度差的矛盾关系。目前自适应分层算法关键在于确定每层的分层厚度,确定方式主要有尖端高度法、竖直法向轮廓切线角法、模型表面曲率法、相邻截面面积比值法、三角面片法向量法等。

使用相邻截面面积比值法确定自适应分层厚度,当模型实体结构分布不均匀时,该方法无法考虑截面复杂程度对于分层厚度的影响,判断条件较多,随着模型复杂度的提升,其算法难度增大<sup>[5]</sup>。通过模型表面曲率法来确定自适应分层的厚度<sup>[6]</sup>,由于砂型在水平和竖直方向具有多空腔多曲率特征,此方法数据量大、算法实现困难。采用竖直法向轮廓切线角法确定自适应分层厚度<sup>[7]</sup>,该方法是采用一定的角度确定轮廓线,无法提取没有采样轮廓线的表面曲率,不能完全识别砂型模型关键特征,影响模型成形精度。基于三角面片法向量法的

自适应分层方式将模型特征的三角面片法向量与分层厚度联系起来<sup>[8]</sup>,具有原理简单、运算方便的特点,但是目前基于法向量的自适应分层算法并没有应用于多轮廓类模型中,需要进一步进行优化。文献[9]考虑同一切平面内的模型曲率特征的自适应切片算法,在实际打印中,需要设定精度误差阈值,对于复杂砂型结构,在不同切平面给定参数范围比较难实现<sup>[10]</sup>。

综上所述,目前自适应切片算法研究主要集中在沿着打印方向上采用较少的分层层数,以减少台阶效应的影响,提高成形效率,但在同一切平面方向上,砂型模型存在多轮廓、多空腔和多曲率特征,现有的自适应分层算法对于同一切平面存在的上述特征无法较好地识别,数据运算量大、无法保证同一切平面所有特征都满足精度要求等问题,所以对于砂型多轮廓类模型的适用性较少<sup>[11]</sup>,同时铸件大型化带来的STL模型大量网格的高效处理,限制了自适应切片算法在砂型3D打印领域进一步应用。因此本文考虑砂型水平方向模型特征,利用三角面片的法向量确定分层厚度,并利用切平面与相交的三角面片之间最小二面角 $\gamma_{\min}$ 优化现有的自适应分层算法来确保砂型模型在沿打印和水平方向的所有轮廓特征都能满足精度要求。利用MATLAB编程实现泵壳铸件的自适应分层及切片数据的导出,实现复杂工业用砂型的高效高精度制造,为未来自适应切片算法在砂型3D打印领域的应用提供了研究基础。

## 1 研究方法

首先选取泵壳铸件CAD模型,根据铸造手册的标准,设计浇道和冒口结构,利用通用绘图软件UG进行砂型(芯)模型的CAD建模,泵壳砂芯CAD模型尺寸为260 mm×400 mm×204 mm,泵壳整体砂型CAD模型尺寸为810 mm×774 mm×467 mm,泵壳上砂型模型尺寸为810 mm×774 mm×217 mm,其铸件与砂型(芯)CAD建模示意图如图1所示。

由图1(b)可知,泵壳表面曲率变化区间复杂,泵壳砂型内腔复杂,存在同一平面上轮廓曲率差异较大的情况,在打印方向也存在不同的曲率特征。由图1(d)可知砂型模型存在浇冒口、内部型腔等复杂结构,因此在水平方向上具有多空腔特征,并且水平方向不同空腔曲率不同,同时沿着打印方向也存在不同的曲率变化,根据砂型模型的特征,将其定义为多轮廓类模型。

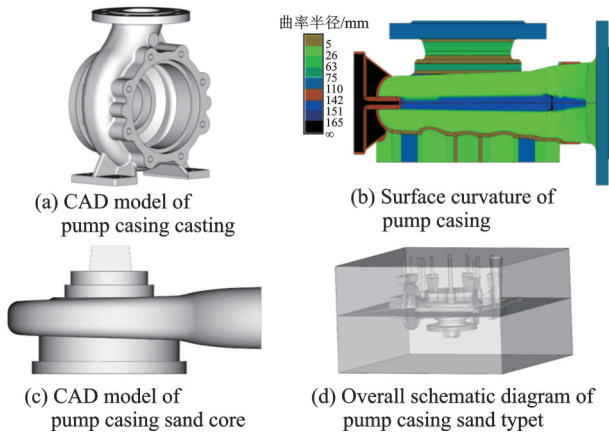


图 1 铸件与砂型/砂芯 CAD 模型

Fig.1 CAD model of casting and sand mold/core

以该泵壳砂型模型为例开展具体研究, 包括 STL 文件的读取和法向量的预处理、提取的切平面相交的三角面片单位法向量  $Z$  向绝对值的最大值  $|Z_f|_{\max}$  特征值保证砂型内部每部分轮廓的最高精度成形、建立拓扑邻接有序三角面片环高效处理三角面片计算数据。下面是具体的多轮廓切片算法逻辑步骤。

首先采用 Stread 函数读取砂型/芯 STL 模型,

并存储三角面片链表集合 ConnectivityList, 获取三角面片顶点坐标集矩阵  $C_{Points}$ , 并采用 FaceNorm 函数提取三角面片面内法向量, 进行单位化处理和提取法向量角度集合  $\theta_{angles}$ 。

针对砂型模型的模型特征, 利用三角面片顶点的空间坐标信息, 寻找其 STL 模型的最值坐标  $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}, z_{\min}, z_{\max}$  以及三角面片法向量角度集合, 将内部轮廓和外部轮廓采用 Setdiff 函数进行模型拆分, 对砂型内部结构进行自适应分层。

确定初始切平面, 确定分层最小厚度  $h_{\min}$ 、最大分层厚度  $h_{\max}$ , 以及分层厚度范围为  $h_{\min} \sim h_{\max}$ , 初始化层高  $z_1 = h_{\min}$ 。

然后通过检索每层切平面的三角面片法向量  $Z$  向分量的最大值计算各层的分层高度, 并求取切平面与每组三角面片的交点坐标, 然后确定下一层分层厚度  $z_{i+1} = z_i + \Delta H$ ,  $\Delta H = h_{\min} + (h_{\max} - h_{\min}) \times (1 - |Z_f|_{\max})$ 。

接下来判断切平面高度  $z_{\text{slice}}$  与  $z_{\max}$  的高度大小, 若切平面高度高于模型最大高度就结束自适应切片过程, 否则就继续计算下一层的分层厚度。图 2 为本文所提多轮廓自适应切片算法流程图。

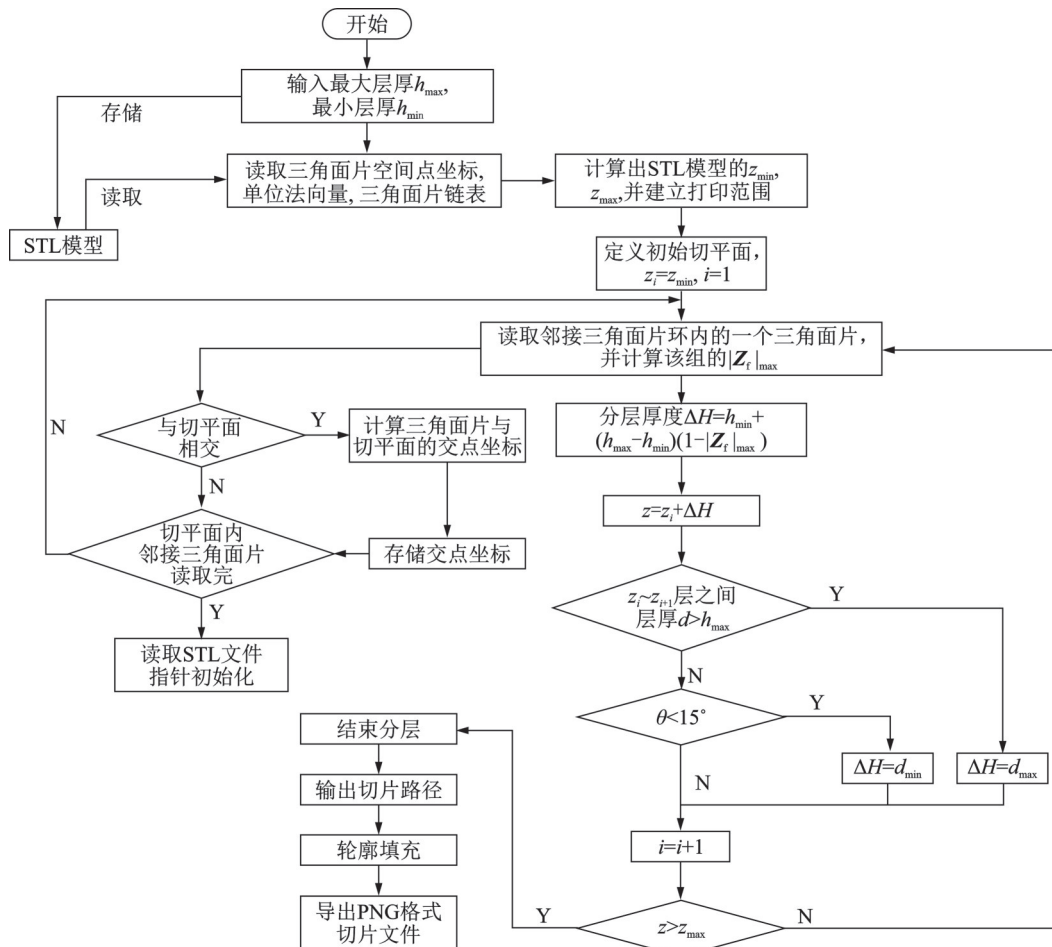


图 2 多轮廓自适应切片算法流程图

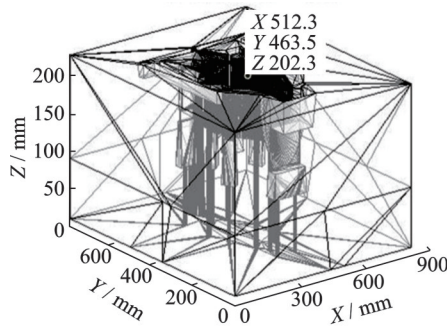
Fig.2 Flowchart of the multi-contour adaptive slicing algorithm



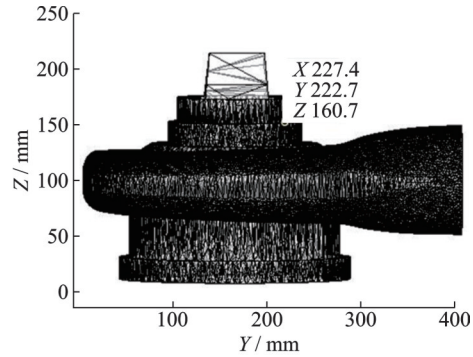
## 2 研究过程

### 2.1 STL文件读取

STL文件是由点组成三角面片逼近三维实体模型的数据模型<sup>[12]</sup>,通过MATLAB中的Stread函数读取二进制形式的STL砂型模型,再调用Patch函数的显示模型的透明度、线条颜色和三角



(a) Sand STL model on pump casing



(b) Pump casing sand core STL model

图3 泵壳砂型/芯 STL模型

Fig.3 Pump casing sand/core STL model

### 2.2 砂型STL模型内外轮廓分型

根据铸造砂型砂芯模型特点,单一轮廓类的砂芯STL模型自适应切片研究较多,然而多轮廓类的砂型模型的自适应切片在国内外还未展开研究<sup>[13]</sup>,本文提出了一种兼具内外轮廓剖分的自适应切片算法,其能够兼顾单一轮廓类模型和多轮廓类模型的自适应切片。

将泵壳砂型STL文件读取以后,采用MATLAB中FaceNormal函数进行砂型模型法向量的提取,其中泵壳上砂型模型的法向量提取示意图如图4所示。

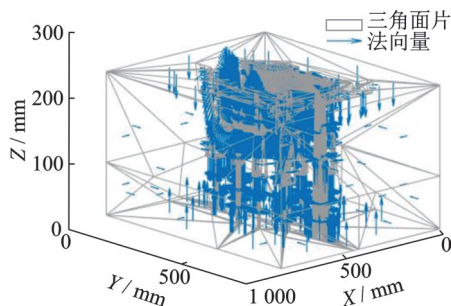


图4 泵壳上砂型STL模型法向量提取示意图

Fig.4 Schematic diagram of STL model normal vector extraction for sand type on pump casing

其中FaceNormal输出的 $F$ 是3列矩阵即三角形标识,指定为列向量,其每个元素对应于三角剖分对象中的单个三角形。每个三角形的标识号是ConnectivityList属性的对应行号 $(x, y, z)$ ,其中每行包含与TR.ConnectivityList中的一个三角形对应的法向坐标 $(u, v, w)$ 。

面片的点集坐标等信息,如图3所示。通过输出该模型的三角面片的点集 $C_{Points}$ 和三角分连接列表 $C_{ConnectivityList}$ ,都是 $n \times 3$ 的矩阵, $C_{Points}$ 矩阵存储每个三角面片的顶点坐标, $C_{ConnectivityList}$ 中每个元素是每个顶点ID,每行代表着三角剖分中的一个三角形,最后对读取的二进制的砂型/芯模型进行自适应分层研究。

由于砂型模型具有不同的内腔,其内腔曲率也不尽相同,在自适应分层前,需要进行模型剖分预处理,主要识别内轮廓曲率,并按照内轮廓曲率进行自适应分层,并排除外轮廓曲率干扰<sup>[14]</sup>。定义内外轮廓主要步骤为:对提取的三角面片法向量坐标进行单位化处理,并将三角面片法向量与打印方向之间的夹角 $\theta$ 通过弧度制转换,使得 $\theta \in \left[0, \frac{1}{2}\pi\right]$ 。

提取所有的拓扑轮廓集合, $[M, N] = (C_{Points}, C_{ConnectivityList}, \text{单位法向量坐标 } c(x, y, z), \text{法向量角度信息 } Q_{angles})$ 。 $M$ 集合读取的STL砂型模型三角面片法向量 $\theta = \frac{1}{2}\pi$ 时所有的拓扑集合,将每个三角面片单位法向量空间坐标的最大值 $c(x, y, z)_{\max}(x, y, z)_{\max}$ 、最小值 $c(x, y, z)_{\min}(x, y, z)_{\min}$ 与每个三角面片点的空间坐标 $(x, y, z)$ 构建数据对应结构,若三角面片集单位法向量中 $\theta \in \left(0, \frac{1}{2}\pi\right) \wedge \left\{ \theta = \frac{1}{2}\pi \mid (x, y, z)_{\min} < c(x, y, z) < (x, y, z)_{\max} \right\}$ 时,则被判定为非外部轮廓,然后采用MATLAB的Setdiff函数将非外部轮廓提取出来,如图5所示。

通过将砂型内外轮廓分别提取出来,并进行后续的自适应分层,而外部轮廓则与内部轮廓的切分厚度保持一致。

### 2.3 自适应分层厚度的确定

确定多轮廓砂型结构的自适应分层厚度需要

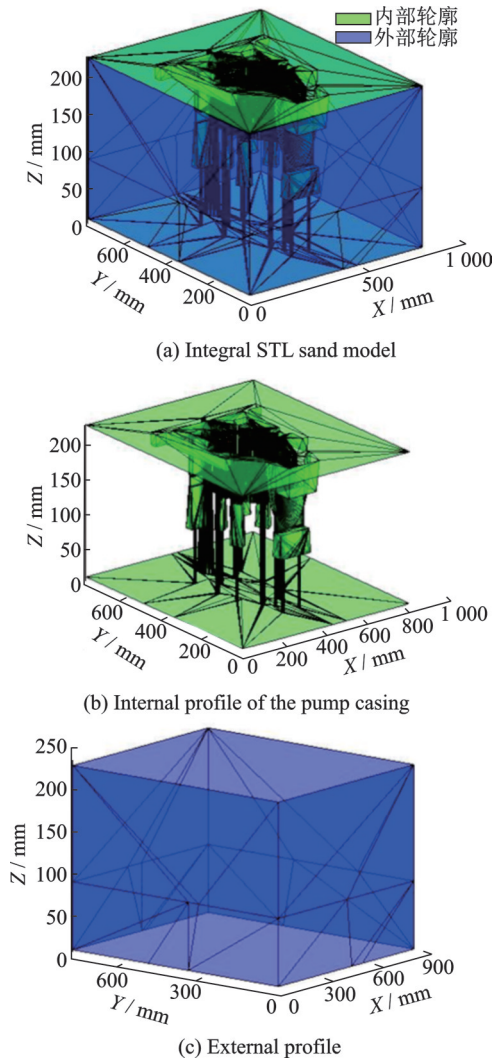


图 5 泵壳上砂型内外轮廓提取图

Fig.5 Extraction of the inner and outer contours of the sand mold on the pump casing

考虑砂型多轮廓特征,砂型 STL 模型具有复杂内腔、浇道、浇冒口和排气孔等复杂结构等特征,并且在同一切平面内,模型三角面片法向量与 XOY 水平面的夹角也不相同,因此需要将所提取的 STL 模型法向量数据与分层厚度相联系。

Dolenc 等<sup>[15]</sup>提出一种衡量台阶误差的方法,即尖端高度,由图 6 分析可知尖端高度与打印层厚,打印倾角有关,分层厚度越大,打印倾角越小即模型三角面片法向量与打印 Z 向之间的夹角  $\theta$  越小,台阶效应越明显。其中尖端高度可以表示为

$$\delta = d_i \times \cos\theta \quad (1)$$

$$\theta = \arccos\left(\left|\frac{Z' \cdot N_i}{|Z'| \times |N_i|}\right|\right) \quad (2)$$

式中: $d_i$ 为  $n_i$  与  $n_{i+1}$  两分层平面的分层厚度,通常采用  $\epsilon_{\max}$  来反映整个模型的误差大小。打印成形方向 Z 向,其单位向量记为  $Z'=[0,0,1]$ ,任意砂型

STL 模型三角面片法向量记为  $N_i=[x_f, y_f, z_f]$ ,根据对三角面片法向量进行单位化处理,将  $\theta$  角控制在  $\left[0, \frac{1}{2}\pi\right]$ 。则模型误差为

$$\epsilon = d_i \times |N_i|_{\max} \quad (3)$$

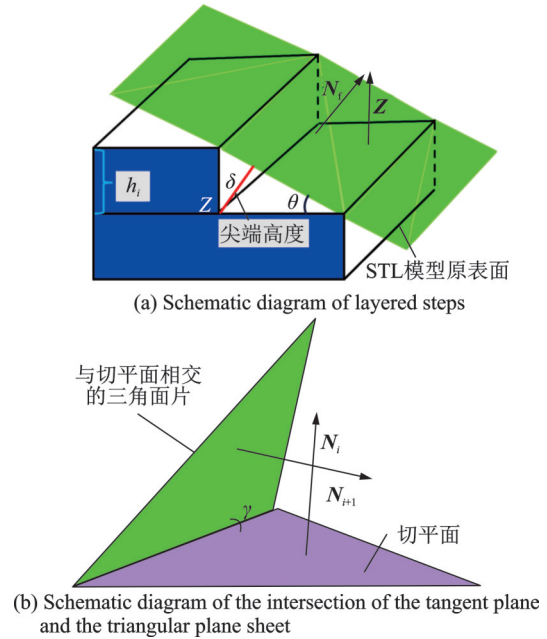


图 6 自适应切片确定分层厚度原理图

Fig.6 Schematic diagram of adaptive slicing to determine layering thickness

根据上述模型台阶误差进行分析,如图 7 所示,要减小台阶误差的影响,即当倾斜角  $\theta$  越小,可以采用砂型打印所需的小层厚分层,当倾斜角  $\theta$  较大或者为  $\frac{\pi}{2}$  时,尽可能采用砂型打印的最大层厚来进行分层,以平衡均采用小层厚分层时的成型时间,因此可以利用砂型打印成形机所能采用的最小铺砂厚度  $h_{\min}$  和允许打印的最大铺砂厚度  $h_{\max}$  与打印倾斜角  $\theta$  来共同确定分层厚度的大小。

$$\Delta H^1 = h_{\max} - (h_{\max} - h_{\min}) \times \cos\theta \quad (4)$$

将式(2)代入式(4)得

$$\Delta H^2 = h_{\max} - (h_{\max} - h_{\min}) \times |N_i| \quad (5)$$

但是在同一切平面,该分层厚度公式只有单一变量  $\cos\theta$ ,不能同时对切平面内不同曲率部分模型进行最小自适应分层厚度的确定。为了使提取的砂型内轮廓曲率每部分都能达到精度要求,需考虑砂型的模型特征,通过切平面与之相交三角面片单位法向量之间的夹角  $\gamma$  的大小来判断模型在同一切平面内的复杂程度。该二面角  $\gamma$  与其三角面片单位法向量的关系式如下

$$\gamma = \pi - \arccos(N_i \cdot N_{i+1}) \quad (6)$$

$$\Delta H^3 = h_{\min} + (h_{\max} - h_{\min}) \times \cos\left(\frac{1 - \cos \gamma}{2}\right) \quad (7)$$

在该特征二面角部分,读取该三角面片法向量在分层方向上的分量,计算该法向量 $Z$ 向绝对值最大值,在该特征处采用较小的分层厚度。由此可以推理出使砂型内腔轮廓每部分都达到打印精度的要求,可以找到切平面与切平面上三角面片之间二面角的最小值 $\gamma_{\min}$ ,可用该位置处三角面片所求得单位法向量坐标绝对值的最大值 $|Z_f|_{\max}$ 来表示,即最终确定的自适应分层厚度计算式为

$$\Delta H^4 = h_{\min} + (h_{\max} - h_{\min}) \times (1 - |Z_f|_{\max}) \quad (8)$$

## 2.4 建立拓扑邻接轮廓

读取该泵壳铸件 STL 模型的  $C_{\text{Points}}$  和  $C_{\text{Connectivitylist}}$  矩阵结果,其中  $C_{\text{Points}}$  矩阵有  $11\,911 \times 3$  组数据,  $C_{\text{Connectivitylist}}$  有  $23\,874 \times 3$  组数据,该三角面片的数据计算量较多,需更进一步进行拓扑轮廓的构建。构建原理为,根据已读取的全局  $C_{\text{Connectivitylist}}$  中面集矩阵和  $C_{\text{Points}}$  中的点集矩阵读取点、线和面之间的关系,利用拓扑邻接关系,寻找邻接三角形<sup>[13]</sup>,构建步骤如下:当切平面与三角面片相交第1个产生交点时,记为第1个切平面,每个节点的精度设置为  $1 \times 10^{-5}$ ,然后将每个三角面片与切平面相交线段的节点进行存储,最后重新按照邻接三角

形位置排序,按照每个节点 $Z$ 坐标的最小值 $Z_{\min}$ 到最大值 $Z_{\max}$ 进行排序,若每个相邻节点的精度范围小于  $1 \times 10^{-5}$ ,设为冗余点的阈值 $\lambda$ ;其冗余顶点需满足式(9);若不满足式(9),则进行冗余点的去除。

$$|p_i x - p_y x| < \lambda \cup |p_i y - p_j y| < \lambda \cup |p_i z - p_j z| \quad (9)$$

构建无向图需要计算两个节点之间的距离,其中节点的邻接关系可以用欧拉距离公式来得到<sup>[16]</sup>,两个节点 $(x_1, y_1, z_1)$ 和 $(x_2, y_2, z_2)$ 的欧拉距离为

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (10)$$

每个节点采用迪杰斯特拉算法找到与该节点直接相连的距离最短的节点,并将这两个节点之间的边加入无向图中,计算式如下

$$d_{ij} = \min(d_{ij}, d_{ik} + d_{kj}) \quad (11)$$

式中: $d_{ij}$ 表示点 $i$ 到点 $j$ 的最短距离, $d_{ik}$ 和 $d_{kj}$ 分别表示点 $i$ 到点 $k$ 和点 $k$ 到点 $j$ 的距离。对于每个三角面片,将其3个节点连接起来,形成一个闭环,并将三角形邻接的其他三角面片节点加入这个闭环中,重复计算直至所有三角邻接轮廓构建完毕,结果如图7所示。

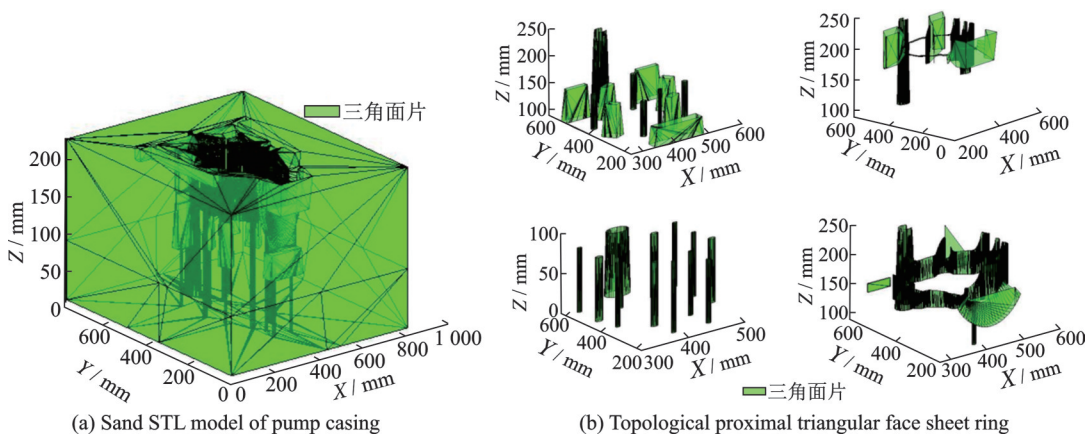


图7 泵壳砂型部分拓扑邻接示意图

Fig.7 Schematic diagram of the topological neighborhood of the sandy part of the pump casing

## 2.5 自适应分层算法实验与分析

本文采用 MATLAB 编程实现了本文所提出的自适应切片算法,为了检验该算法的可行性和适用性,对泵壳铸件进行浇注系统设计并进行砂型和砂芯的数字化建模,采用本文的自适应切片算法进行自适应分层和等厚分层对比试验研究,分层层数反映砂型 3D 打印成形的效率,最大尖端高度反映砂型 STL 模型分层的台阶效应。以泵壳下砂型的 STL 模型为例,按照本文所提出的自适应切片算法进行自适应分层,不同分层高度时检索的邻接轮廓

环及部分切片过程如图8所示。

采用 100/200 目硅砂,打印呋喃树脂含量设置为 2%,打印固化剂质量分数为 2%,打印速度设置为 45 mm/s,打印层厚分别为 0.2~0.6 mm 区间内的自适应分层和 0.6 mm 等厚分层,采用南京航空航天大学自主研发的数字化多材质砂型整体打印设备,进行泵壳砂芯模型在自适应分层和等厚分层的打印成形,并采用奥林巴斯显微镜进行表面粗糙度的测量,不同切片算法下砂芯成形实例如图9所示。



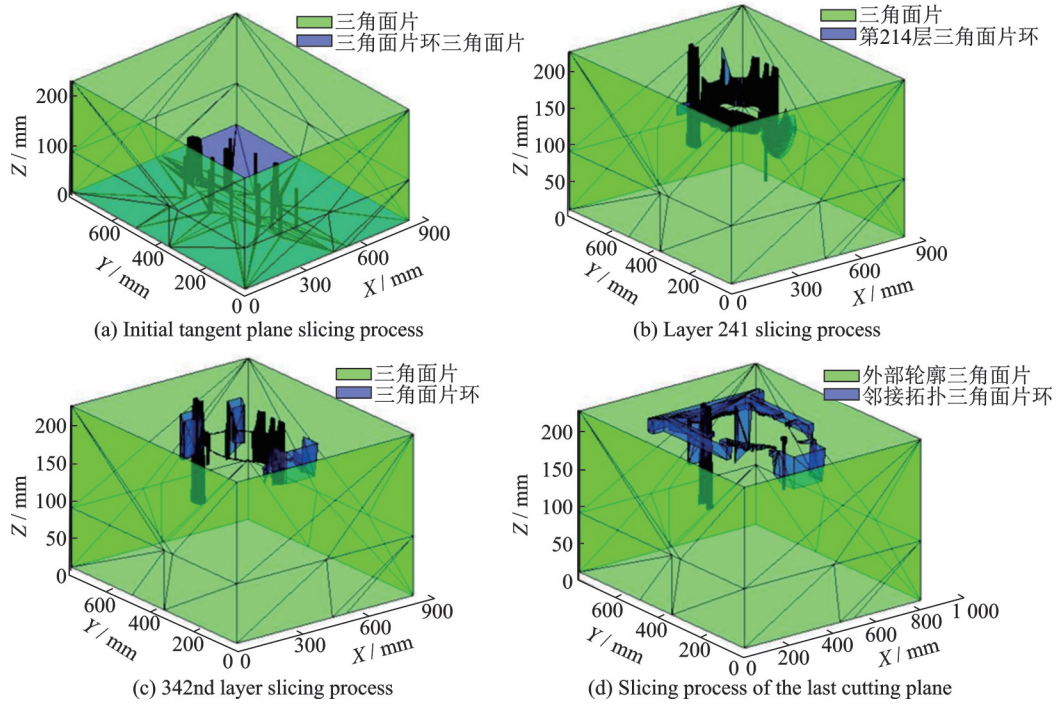


图 8 泵壳砂型在不同切平面时的自适应分层过程图

Fig.8 Adaptive layering process of pump casing sand model at different cutting planes

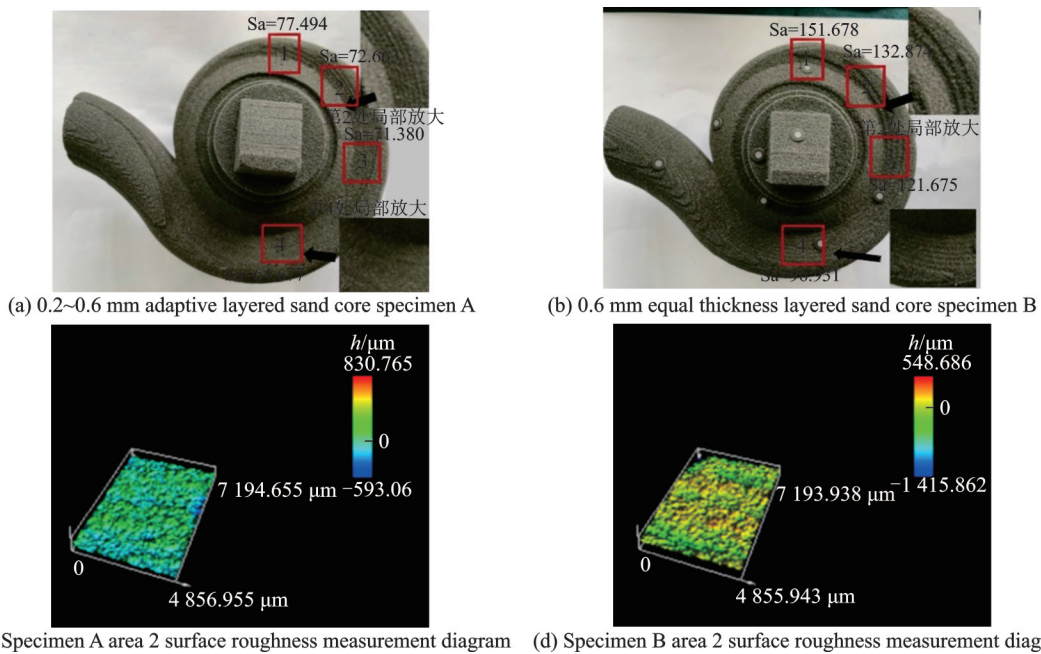


图 9 泵壳砂芯打印样件图

Fig.9 Pump casing sand core printout

在成形质量方面,根据打印成形样件,可知 0.2~0.6 mm 试样表面相较于 0.6 mm 等厚分层的台阶纹路更小,表面更光滑。分别对泵壳砂型曲率较大的 4 个区域进行粗糙度测量,图 9(a)试样 A 的 4 个区域表面粗糙度 Sa 的测量值为 77.494、72.663、71.389、64.677  $\mu\text{m}$ ,而图 9(b)试样 B 的 4 个区域表面粗糙度 Sa 的测量值分别为 151.678、132.874、121.675、96.931  $\mu\text{m}$ 。根据实际泵壳砂芯打印,可以看出 0.2~0.6 mm 自适应分层具有良好的表面质量,较低的表面粗糙度。

实验条件下打印成型效率为 1.5 min/层,泵壳砂芯 STL 模型尺寸为 260 mm  $\times$  400 mm  $\times$  204 mm,泵壳上砂型 STL 模型尺寸为 810 mm  $\times$  774 mm  $\times$  217 mm;以 Z 向为打印方向,进行自适应分层实验,最小分层厚度设置为 0.2 mm,最大分层厚度设置为 0.6 mm。采用 4 组等厚分层的方式进行对比试验,等厚分层的厚度分别设置为 0.2 mm、0.6 mm,不同切片方式结果如图 10 所示,切片对比分析结果如表 1 所示。

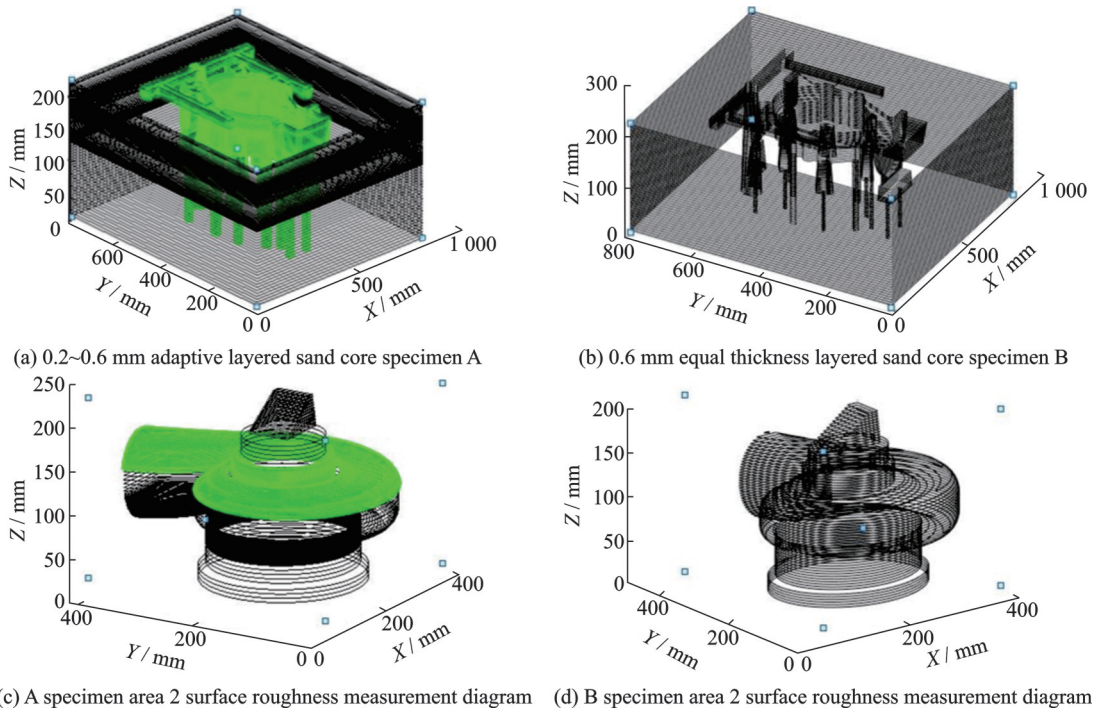


图10 等厚分层与自适应分层切片图

Fig.10 Isothickness layered and adaptive hierarchical slide plots

表1 切片结果对比分析

Table 1 Slice results analysis

STL模型	分层方式	切片厚度/mm	层数	成形时间/min	最大尖端高度/mm	检索面数量
泵壳砂芯	自适应分层	0.2~0.6	532	798	0.19	72
	等厚分层	0.2	1 019	1 528	0.19	7
	等厚分层	0.6	340	510	0.58	72
	等厚分层	0.6	340	510	0.58	717
泵壳砂型	自适应分层	0.2~0.6	594	891	0.18	755
	等厚分层	0.2	1 083	1 624.5	0.18	755
	等厚分层	0.6	361	541.5	0.58	755
	传统等厚分层	0.6	361	541.5	0.58	23 874

由表1可知,采用自适应分层的方式,在最大尖端高度相同的前提下,分层层数更少。采用0.2 mm的等厚分层,该STL模型分层层数为1 019,最大的尖端高度为0.19 mm。本文提出的自适应分层算法采用0.2~0.6 mm的自适应分层,其最大尖端高度也为0.19 mm,但分层层数为532层。在保证最小精度的前提下,采用0.2~0.6 mm的自适应分层算法打印泵壳砂芯的成形时间为798 min,采用0.2 mm的等厚分层算法成形时长为1 528 min,打印成形效率提高了91.5%,同理可以推出,泵壳砂型成形效率提高了82.3%。根据分层层数可知,砂型3D打印采用自适应分层算法不仅能兼顾模型的表面精度,大幅提高砂芯成形效率,并建立拓扑邻接轮廓,检索面数量相较于传统的等厚分层算法极大减少,泵壳砂芯STL模型检索面总量减少了91.4%,泵壳砂型STL模型检索

面减少了96.9%,为大型化砂型STL模型的高效切片提供了解决思路。

### 3 结 论

本文研究砂型增材制造多轮廓自适应切片算法,平衡了复杂结构砂型增材制造成形精度和效率的关系,解决了传统砂型成形过程中表面质量和成形时间不能同时兼顾的难题,提高了砂型增材制造表面精度和效率。本文主要工作如下:

(1)本文提出了一种砂型增材制造多轮廓自适应切片工艺和成形方法,采用自适应厚度分层的方式代替等厚分层的方式进行切片,实现打印精度和成形时间的有效平衡,相对于0.2 mm的等厚分层的打印方式,泵壳砂芯/砂型成形效率显著提高。

(2)采用0.2~0.6 mm的自适应分层和0.6 mm的等厚分层砂芯模型打印,最大曲率区域的表面粗



糙度分别为  $77.494 \mu\text{m}$  和  $151.678 \mu\text{m}$ , 研究结果表明, 采用自适应分层方式进行砂芯的 3D 打印成形可以有效地降低砂型表面的粗糙度。

(3) 采用单位法向量  $Z$  向坐标的最大值和打印设备的最大层厚和最小层厚确定分层厚度, 针对砂型模型具有同一切平面多曲率进行砂型内外轮廓分型研究, 从而避免内外多轮廓曲面的干涉影响, 扩展了自适应切片算法在砂型 3D 打印领域的应用。

#### 附表: 多轮廓砂型 STL 模型内外轮廓拆分代码

Algorithm 1: Inner and outer contour splitting algorithm:

```
function Indn90=ExtractTriangle1(nIndn90, points,
ConnectivityList, zs, color)
Indn90=[];
for i=1:length(nIndn90)
    p1=points(ConnectivityList(nIndn90(i),1),:);
    p2=points(ConnectivityList(nIndn90(i),2),:);
    p3=points(ConnectivityList(nIndn90(i),3),:);
    pp=[p1; p2; p3];
    zmin=min(pp(:,3));
    zmax=max(pp(:,3));
    if (zmin<=zs && zs<=zmax)
        Indn90=[Indn90;nIndn90(i)];
    else
        gajrgjkankas=1;
    end
end
```

Algorithm 2: Inner and outer contour extraction algorithm:

```
function [P, C]=ExtractTriangle(nind, points, ConnectivityList)
changeind=[];
P=[];
C=[];
for i=1:length(nind)
    changeind=changeInd(changeind, nind(i), ConnectivityList);
    c=[];
    for col=1:3
        ind1=ConnectivityList(nind(i),col);
        ind=find(ind1==changeind(:,1),1);
        if ~isempty(ind)
            c=[c changeind(ind,2)];
        end
    end
    C=[C;c];
end
if ~isempty(nind)
```

```
        P=points(changeind(:,1),:);
    end
endfunction changeind=changeInd(changeind, row,
ConnectivityList)
for col=1:3
    ind1=ConnectivityList(row,col);
    if isempty(changeind)
        changeind=[changeind;[ind1 size(changeind,
1)+1]];
    else
        ind=find(ind1==changeind(:,1),1);
        if isempty(ind)
            changeind=[changeind; [ind1 size
(changeind,1)+1]];
        end
    end
end
end
```

#### 参考文献:

- [1] 赵火平. 微喷射粘结快速成形铸造型芯关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.  
ZHAO Huoping. Research on key technology of micro-jet bonded rapid molding casting core[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [2] 王德鹏. 3D 打印分层与路径规划算法的研究与应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.  
WANG Depeng. Research and application of 3D printing layering and path planning algorithm[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [3] 党元清. 生物 3D 打印切片算法及路径规划方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
DANG Yuanqing. Research on slicing algorithm and path planning method for bio-3D printing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [4] JWANG Junwei, CHEN Xing, DENG Yimin, et al. Research on adaptive layering of feature information of STL model[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(6): 244-251.
- [5] ZENG Long, MAN-LIP L L, QI D, et al. Efficient slicing procedure based on adaptive layer depth normal image[J]. Computer Aided Design, 2011, 43(12): 1577-1586.
- [6] WANG X, CAO J, CAO Y. A new multiobjective optimization adaptive layering algorithm for 3D printing based on demand-oriented[J]. Rapid Prototyping Journal, 2023, 29(3): 246-258.
- [7] 田仁强, 刘少岗, 张义飞. 增材制造中 STL 模型三角面片法向量自适应分层算法研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(3): 415-421.

- TIAN Renqiang, LIU Shaogang, ZHANG Yifei. Research on adaptive layering algorithm for triangular facet normal vector of STL model in additive manufacturing[J]. Mechanical Science and Technology, 2019, 38(3): 415-421.
- [8] LUO N, WANG Q. Fast slicing orientation determining and optimizing algorithm for least volumetric error in rapid prototyping[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(5/6/7/8): 1297-1313.
- [9] 曹珊,李淑娟. 三维打印技术工艺参数对制件表面形貌的影响[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(7): 6.  
CAO Shan, LI Shujuan. Influence of process parameters of three-dimensional printing technology on surface morphology of manufactured parts[J]. Mechanical Science and Technology, 2012, 31(7): 6.
- [10] GIBSON I, ROSEN D, STUCKER B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [11] SONGMAO C, SHIGEN B. Adaptive slicing algorithm based on contour line of CAD model in 3D printing[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2018, 46(2): 38-43.
- [12] SIKDER S, BARARI A, KISHAWY H A. Global adaptive slicing of NURBS based sculptured surface for minimum texture error in rapid prototyping[J]. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21(6): 649-661.
- [13] 李蒙. 三维打印中切片算法的研究与应用[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.  
LI Men. Research and application of slicing algorithm in three-dimensional printing [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017.
- [14] TIAN Renqiang, LIU Shaogang, ZHANG Yifei. Research on adaptive layering algorithm of triangular facet normal vector of STL model in additive manufacturing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(3): 415-421.
- [15] DOLENC A, MKEL I. Slicing procedures for layered manufacturing techniques[J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(2): 119-126.
- [16] HU Y, JIANG X, HUO G, et al. A novel adaptive slicing algorithm based on ameliorative area ratio and accurate cusp height for 3D printing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2022, 28(3): 453-465.

(编辑:陈珺)