

基于增材制造特性的航空发动机叶片快速成型工艺技术研究

宋国强¹, 陈秀生²

(1. 武汉城市职业学院 机电工程学院, 湖北 武汉 430064; 2. 济南大学 机电工程研究院, 山东 济南 530001)

摘要:提出一种基于增材制造特性的航空发动机叶片快速成型工艺方法。从增材制造的材料成型特性入手,通过对喷射丝材成型机理的研究,从三维模型的预处理、成型零件的快速成型和后处理等3个阶段分析了成型工艺参数对成型质量与成型效率的作用关系,并建立了各阶段的优化方案。结果表明,该方法只需传统减材制造的1/5周期即可加工出精度达IT8,表面粗糙度在 $3\mu\text{m}$ 以下的制品,对实现复杂异型结构产品的快速制造奠定了基础。

关键词:FDM快速成型;叶片;喷丝成型机理;成型工艺参数

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)01-0047-07

Research on Rapid Prototyping Technology of Aeroengine Blade based on Manufacturing Characteristics of Additive Manufacturing

SONG Guoqiang¹, CHEN Xiusheng²

(1. School of Mechatronic Engineering, Wuhan City Vocational College, Wuhan 430064, China; 2. School of Mechatronic Engineering, University of Jinan, Jinan 530001, China)

Abstract: A rapid prototyping method for aeroengine blade was presented based on the additive manufacturing characteristics. The relationship between the forming parameters and the craft quality was established by analyzing the pre-treatment of the 3D model, the rapid prototyping and the post-processing of the forming parts. Meanwhile, the optimization schemes at each stage of this process was put forward on the forming mechanism of jet wire. The results show that the method can prepare products with a precision of IT8 and surface roughness below $3\mu\text{m}$ in only 1/5 cycles of conventional materials reduction process. Therefore, the research of this technology lays a theoretical foundation for the rapid manufacturing of complex shaped products.

Key words: FDM rapid prototyping; aeroengine blade; the forming mechanism of jet wire; forming process parameters

在航空发动机中,叶片作为核心部件,凭借其复杂的直纹面结构以及“弯”、“宽”、“掠”、“扭”、“薄”的特点影响着航空发动机的使用性能^[1-3]。从叶片等典型零件的推广至更多空间薄壁零件,以及复杂型面的零件加工一直是一个工业难点,解决此类问题的工艺中,熔模铸造逐渐成为解决航空航天复杂类零件的首选方案,然而熔模铸造在针对具有复杂型面结构产品的开模难度较大,其产品结构越复杂,开模周期、成本也就越高。如何实现复杂型面结构产品的快速制造,已成为该领域中的一个亟待解决的热点。“增材制造”通过把三维模型反复转为二维层

片的过程,大大降低了各种形状特别复杂类零件的加工难度,从某中程度上实现“降维制造”,利用“增材式”3D打印技术可以实现型芯复杂内部结构的快速制造,且能保证制件的良好精度^[4]。基于上述3D打印的优势,考虑到FDM技术将热塑性材料应用到工业生产中,可以打印出具有较高的强度、精度和较小的机械应力的制件,同时可发挥加工成本低、材料应用广、材料的利用率高的优势,使之越来越多应于各类零部件及概念模型。本文以叶片为研究对象,研究叶片的FDM快速成型技术对自由曲面的参数的设计工艺,探究FDM快速成型技术的成型机理、误差在各个阶段的累计机理和建立补偿机制,以及针对不同型面模型的放置要对各个片层的影响,建立针对复杂型面的3D打印优化方案及检测反馈机制,以确保叶片的尺寸精度和表面质量,其流程如图1所示。

收稿日期: 2018-05-24

基金项目: 山东省农机装备研发创新计划项目(2016YF017)

作者简介: 宋国强(1976-),湖北鄂州人,硕士,讲师,研究方向:

机械制造与自动化等。电话: 17629013010,

E-mail: wwx20180523@163.com

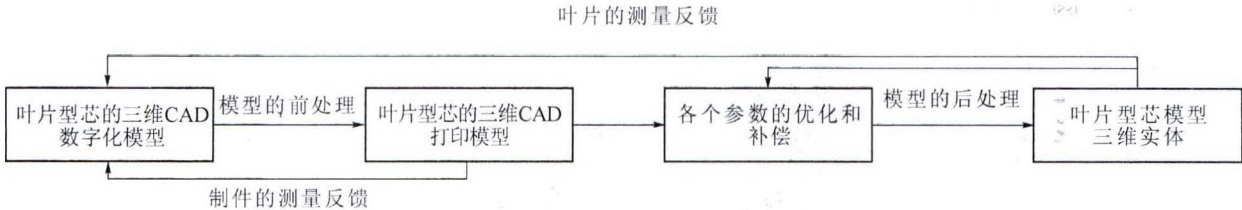


图 1 FDM 快速成型叶片的制造工艺流程
Fig.1 Manufacturing process of FDM rapid prototyping blade

1 叶片型芯的成型工艺和设备的选择

目前“增材制造”中的 3D 打印技术从加工材质与成型方式的两个方面分类,将“3D 打印”技术分为:DLP 快速成型技术、LOM 快速成型技术、SLS 快速成型技术、FDM 快速成型技术和 SLA 快速成型技术^[5,6]。其中 FDM 的成型精度在 0.1~0.3 mm 左右,精度虽然比 SLA 快速成型低,但制造出的制件硬度和耐高温情况适合制作型芯模型,其相应的成本较低,适合小批量制造,同时在成型精度,成型硬度以及制作成本上符合设计要求。本课题的选择成型机为 JMT-400 快速成型机,相应材料为 PLA,其性能参数列于表 1。

2 数字模型的前处理

2.1 叶片型芯模型的放大处理

采用 FDM 快速成型技术对叶片型芯模型进行“增材式”制造,因为 PLA 材料在由液体变为固体过程中,材料相变收缩,宏观表现为叶片型芯模型有一定比例的收缩,因此该因素需要考虑,因制件收缩与材料密切相关,两者关系如下:

$$S_v=(S_L+1)^3-1 \tag{1}$$

式中, S_L 为材料的线性收缩率; S_v 为制件的体积收缩率。

式(1)为理论公式,对叶片型芯这种复杂型面制件来说不同部位其实际收缩状况不同,针对这种状况对三维数字化模型的尺寸 L_s , 常规 3D 打印叶片型芯模型的测量尺寸 L 根据测量公式(2)得到叶片几个关键部位的收缩率,反馈到三维数字化模型,其各个部分特征的收缩率如表 2 所示。

$$S_L=(L-L_s)/L_s \tag{2}$$

2.2 叶片型芯三维模型数据转换处理

叶片型芯模型进行初步缩放处理后,需要对三维 CAD 模型进行层片处理,并将二维层片数据信

息导入到 3D 打印软件中进行加工。目前,国际上主流的做法是将三维 CAD 模型导出了中间格式,然后在专业的 3D 打印软件中对中间格式模型进行层片化处理。该处理方式在数据量,容错率等还有不足,但是可以生成有效支撑,故对叶片型芯模型的数据转化处理采用第二类方法^[7,8]。

考虑到 STL 作为二进制格式具有文件尺寸小、易于传输的特点被广泛应用。其原理是通过面描述的最小单位三角形来近似替代,将三维模型用 N 个理论上可以无限小的三角面片来近似替代之前的三维 CAD 模型。由于这种近似替代,使得 STL 格式化后的叶片型芯模型同之前 NX 平台中的三维模型存在了误差,转化格式带来的误差本质上是弦高误差,因此合理的控制弦高误差是控制模型精度的关键。如图 2 所示,减少弦高误差时,三角面片增多,极限轮廓更逼近原模型;降低弦高误差 H 到极限,即超过 FDM 快速成型工艺的精度时,三角面片的数量不再决定型芯的表面质量和精度而过多三角面片会造成数据指数式的增加,延迟运算时间,造成数据冗余^[9]。

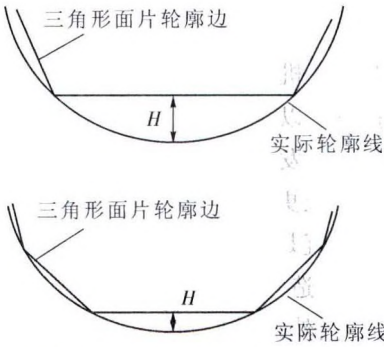


图 2 不同弦高误差对 STL 格式的模型精度影响
Fig.2 Influence of different chord errors on model accuracy of STL

在利用 NX 平台进行叶片型芯三维模型中间 STL 格式转化过程中,若选取曲面时,NX 平台会根据设置的三角公差(弦高误差),并且算法设置上会

表 1 PLA 材料的性能参数
Tab.1 Performance parameters of PLA materials

拉伸强度	极限拉伸率	弯曲模量	耐冲击强度	打印温度	融化温度	线性收缩率	线膨胀系数	线材直径
/MPa	(%)	/MPa	/kJ·m ⁻²	/℃	/℃	(%)	/℃ ⁻¹	/mm
≥60	4	≥60	20	190~230	185~195	1.0	710-5	1.75

表 2 叶片型芯模型各部分的收缩率(%)
Tab.2 Shrinkage rate of each blade core model part

叶身	缘板	榫头
3.32	3.05	2.98

在曲面上提取“质点” $F(x,y)$ 采用式(3)计算各三角面片的最长边,同时有三角公差决定另外两边,相邻公差决定最长边的大小,运算得到相应的 STL 模型。

$$\Omega=3\times\left[\frac{\varepsilon}{2(M_1+M_2+M_3)}\right]^2\tag{3}$$

式中, $M_1=\sup_{(x,y)\in T}\left\|\frac{\partial^2P(x,y)}{\partial x^2}\right\|;$

$$M_2=\sup_{(x,y)\in T}\left\|\frac{\partial^2P(x,y)}{\partial x\partial y}\right\|;$$

$$M_3=\sup_{(x,y)\in C}\left\|\frac{\partial^2P(x,y)}{\partial y^2}\right\|;$$

$F(x,y)$ 是曲面集合上的点; ε 为弦高误差,即点 $F(x,y)$ 到三角形面片 T 的最大边长 Ω 之间的距离; Ω 为面片 T 中的最长的边长。

通过对 STL 格式模型的描述以及 NX 平台中转换格式的原理,从 FDM 快速成型工艺的精度提高一个数量级倒推到 STL 文件的转化精度,得到相对优化的参数设置,通过该参数得到叶片型芯模型的 STL 格式模型。

3 叶片型芯模型快速制造的工艺参数

对上述导出的 STL 模型进行切片处理,FDM 快速成型机中所使用的操作软件主要为 Cura^[10]。因此本节将基于 Cura 操作软件,对 FDM 快速成型工艺中影响叶片型芯制件质量(包括尺寸精度和表面粗糙度)与成型时间的 6 个重要成型工艺参数及成型方向进行分析与设置,其次根据所设置的工艺参数及成型方向通过 Cura 操作软件,对导入的叶片型芯进行切片处理,生成相应 G 代码。

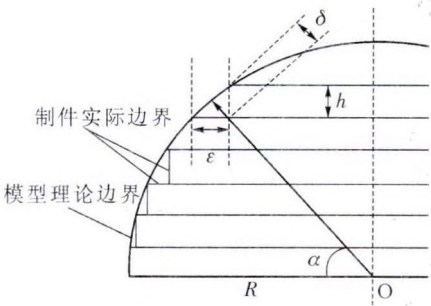


图 3 曲面制件的“阶梯效应”的意图
Fig.3 The intention of “step effect” of curved surface parts

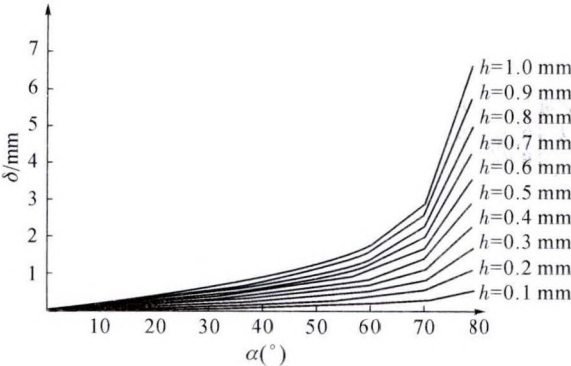
3.1 叶片型芯模型分层厚度的探究^[11]

在 FDM 快速成型时,复杂模型往往有曲面的出现,而曲面的出现必定使每层切片的尺寸渐变过程,从而出现“阶梯效应”,影响制件的表面质量^[12]。为了说明“阶梯效应”建立了如下的数学模型,如图 3 所示。其中 ε 为实际单层打印模型尺寸中与对应理论模型尺寸的最大距离,该参数从很大程度上左右物体的形位精度; δ 表示在理论模型法向方向与实际单层下底面到理论模型的最大距离,此参数很大程度上决定模型的表面光洁度。根据图 3 所示的几何关系推导出曲面体的 ε 与 δ 计算公式为:

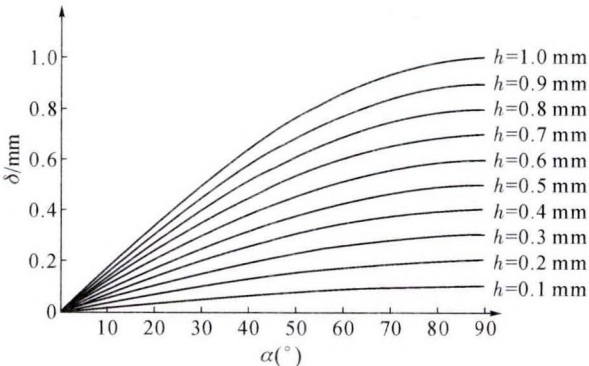
$$\varepsilon=R\left[\cos\alpha-\sqrt{1-\left(\sin\alpha+\frac{h}{R}\right)^2}\right]\tag{4}$$

$$\delta=R\left[1-\sqrt{1-\frac{2h\sin\alpha}{R}-\left(\frac{h}{R}\right)^2}\right]\tag{5}$$

其次,在 MATLAB 中绘制相应的 α - ε 与 α - δ 的关系曲线图,如图 4。可以看出,当 α 一定时,即 3D 打印方向一定时, h 与 ε 和 δ 成正相关即分层厚度越大“阶梯效应”越明显,打印质量也就越差;而 α 的值确定是由 STL 格式模型导入软件后放置模型的位置决定的,由图可知 α 值越小对精度带来的影响越小,由此可知叶片型芯模型层厚的设计越薄越好,同时型芯模型的放置尽量保证 α 角足够小。考虑到快速成型设备的分层厚度受喷嘴直径所限,因此为



(a)分层厚度对 α - δ 影响曲线



(b)分层厚度对 α - δ 影响曲线

图 4 分层厚度对曲面制件的 α - ε 与 α - δ 影响曲线图($R=50\text{ mm}$)
Fig.4 Effect of stratified thickness on α - ε and α - δ curve

了减小“阶梯效应”带来的影响,同时兼顾成型的效率,确定分层厚度为 0.2 mm。

3.2 叶片型芯模型成型方向的探究

叶片型芯模型的成型方向本质上是指叶片在打印过程中的空间摆放形式。FDM 快速成型工艺中,叶片型芯模型不同的摆放形式会在不同的部位生成支撑,支撑的去除对表面质量有相当程度的影响,同时不同的成型方向还会对成型效率产生影响。以长方体模型的打印为例,对长方体模型的成型空间放置形式进行调整,得到如图 5 所示的成型结果,产生上述现象的原因主要是:一方面,当长方体模型的侧面①与打印平台垂直时,模型侧面①的法向量与堆积平面的夹角 α 为 0° ,此时的“阶梯效应”对其尺寸的影响最小,随着 α 的不断增大,“阶梯效应”也不断增大,使得制件侧面①的表面质量随着 α 的增加而降低;另一方面,由于长方体模型的侧面①与打印平台垂直时,不需要设计支撑,从而减少了对尺寸精度的进一步影响。

对于叶片型芯模型中的各个特征来说,存在不同角度的型面特征,不可能保证模型中每个型面上的法向量都与堆积平面的夹角为 0° 而具有较高的质量,为了保证叶片型芯模型各个型面的法向量与堆积平面的夹角 α 较小。因此,将叶片的模型棒头底面为打印底面,这种方式能把叶身这个关键型面的“阶梯效应”降到最低,同时减低了制件的支持部位,避免了去除支撑过程中对表面质量的影响。虽然这样设计牺牲了打印时间,使切片层数增加,增加了打印时间,但总体效果较好。

3.3 叶片型芯模型成型喷头的探究

FDM 快速成型机的挤出丝材形状由喷嘴形状、挤出速度和填充速度共同决定。为了保证丝材连续且均匀挤出,需要恒定时间内挤出丝材的体积与送丝的体积是动态平衡的即:

$$\nu_r \times S_r = \nu_s \times S_s \quad (5)$$

式中, ν_r 为丝材的挤出速度; ν_s 为丝材的送丝速度; S_r

为喷嘴出丝截面积; S_s 为送丝时丝材截面积。送丝过程中丝材为圆柱状其截面积为 S_s , 如式(6)。

$$S_s = \pi \times \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad (6)$$

式中, d 喷头的直径。

丝材的挤出过程由于此时状态为熔融态,在喷嘴的型腔的中受压,并在喷嘴孔壁处成型,厚度由成型机的 Z 轴控制,其丝材挤出过程变形其截面如图 6 所示。其截面积近似可看做长方形,截面方程为式(7)。

$$S_r = h \times p \quad (7)$$

式中, p 为丝材的有效宽度; h 为丝材的截面高度其大小有分层厚度决定。

分层厚度大小的执行,是靠 Z 轴丝杠(平台在丝杠上)与喷头的底面共同决定,在挤出与挤出的过程中有部分能量损失,结合实验数据利用数学统计,近似归纳为线性关系,设其方程为下式。

$$h = a + b\nu_s + c \quad (8)$$

结合(5)、(6)、(7)、(8)得 ν_r 和 ν_s 的关系为:

$$\nu_r = \frac{4hb\nu_s}{\pi d^2} \times \nu_s + \frac{4haw_s}{\pi d^2} + c \quad (9)$$

根据式(9)可知,利用不同丝杠转速下的各个层厚,得出快速成型机的中 h 和 ν_s 的关系,选取转速为 40~100 r/min,中间间隔为 10 r/min 得到的厚度依次为 0.11、0.14、0.19、0.21、0.26、0.30 和 0.34 mm。通过反复测量该数据得到 $h = -0.06 + 0.004\nu_s$ 。在对比试验过程中高速填充对整个机器的响应及各个部分的配合和控制硬件的负荷都比较大。结合经验参数得到层厚为 0.2 mm 时带入式(8)得到丝杠速度为 65 r/min,换算为挤出速度为 68.03 mm/s。

3.4 叶片型芯模型成型温度的选择

在 FDM 快速成型机成型过程中,喷头温度的设置决定着喷头出丝的顺利与否,材料在受热融化并且通过喷头挤出时,如果温度低则丝材的粘度变大,流动性变差容易堵塞喷头,而且温度低时丝材挤

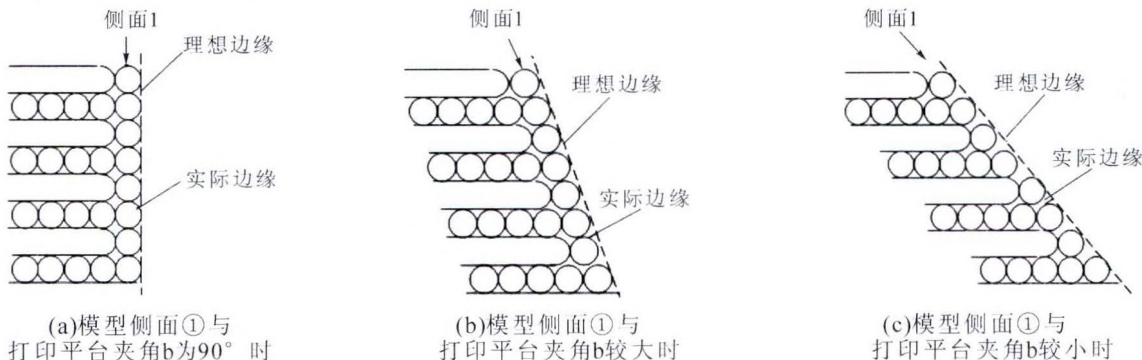


图 5 长方体模型不同摆放形式对应的制件垂直截面放大图

Fig.5 Magnification of Vertical Section of workpiece corresponding to different arrangement of cuboid Model

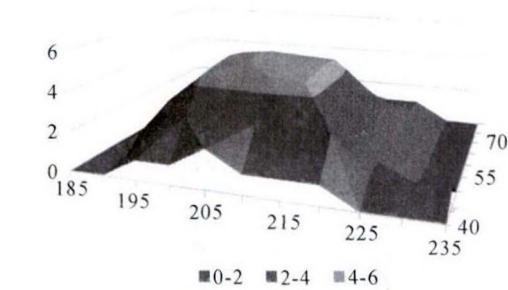


图 6 不同喷头温度与环境温度下的制件成型情况
Fig.6 Molding of parts at different nozzle temperature and ambient temperature

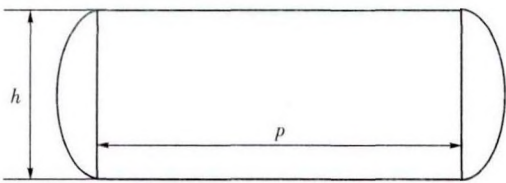


图 7 填充时丝材的截面
Fig.7 Section of filaments during filling

出后各层间粘接变差,造成制件的龟裂,翘曲的等问题^[12]。相反温度过高,材料从熔融状态向液态变化流动性超出极限,粘性也降低,首先容易形成拉丝现象,其次在后一层出丝时上一层尚未冷却凝固,轻者造成表面褶皱,重者制件坍塌不能成型。同样,还有打印机内部的温度调节,决定着制件内部力,以及材料的出丝后的冷却速度问题,过高不易成型,表面褶皱会出现,过低粘结不好,出现翘曲,开缝问题。故合理设置其喷头温度以及相匹配的环境温度相当重要。

为了得到比较合理的温度设置,建立了以长方体(50 mm×50 mm×10 mm)的模型,层厚设置如前所探究的 0.2 mm,材料挤出速度为 68.03 mm/s,根据材料的融化温度 185~195 ℃,以及喷头可设置的温度 180~270 ℃,将环境温度和和喷头温度做一个小型正交试验,探究喷头温度与环境温度共同影响下的制件质量。以 5 ℃为初始步长,初步测试了 185~235 ℃的喷头温度,环境温度在 40~80 ℃进行实验,得到实验数据绘制图 6 如下(注:所有制件质量按 0~5 进行评级,5 时为质量最优状况,0 时未成形有明显裂痕),从而得到最佳的温度为 200 ℃,环境温度 60 ℃。

3.5 丝材形状变化带来的补偿量

FDM 快速成型工艺成型制件过程中丝材从 3D

打印机喷头中被挤出,挤出时的温度比成型室温度高,PLA 材料变为熔融态时有弹性效应,在挤出的瞬间丝材会膨胀但成型室中温度低丝材变成固态,经过固态-熔融态-固态的过程中,丝材会比真实的喷孔直径略大,丝料被喷孔侧壁挤压后截面图如图 7,可知考虑到 Cura 操作软件尚未针对该误差做出补偿,对表面光洁度有影响,需要在后处理过程中进行修正。

要想获得在匹配参数过程中的丝材的精确宽度,需要建立丝材成型的截面模型,为了更准确的描述该模型,将图 6 做了 3 个区域的划分如图 8(a)。其中,Ⅰ、Ⅱ是二次曲线与矩形虚线边围成的对称区域,Ⅲ为矩形区域。利用数学建模对其进行区域参数化,用以研究在参数固定下丝材宽度的定量尺寸,给实际加工做理论支撑。图 8(c)中 CEA 为任意一个二次曲线,其中 C 和 A 为两个切点,延伸线于 B 点,ED 长度为 a,EB 长度为 b, $\zeta=a/(a+b)$ 。有数学几何(样条几何)可知, ζ 与 CEA 的关系如下:(a)当 $0.05<\zeta<0.5$ 时,CEA 曲线为椭圆模型。(b)当 $\zeta=0.5$ 时,CEA 曲线为两个抛物线模型。(c)当 $0.5<\zeta<0.95$ 时,CEA 曲线为双曲线模型。

为了得到更好的理论值,按丝材的打印速度,进行了划分,并进行了模拟计算得到如下推论:

(1)当速度较低时,此时丝材截面中Ⅰ、Ⅱ区域小的可以忽略,简化为 8(a)中的区域Ⅲ。

此时的截面宽度为 W,其截面宽度的计算公式从进丝和出丝的动态平衡中可以找到模型计算,式(10)可以概括。

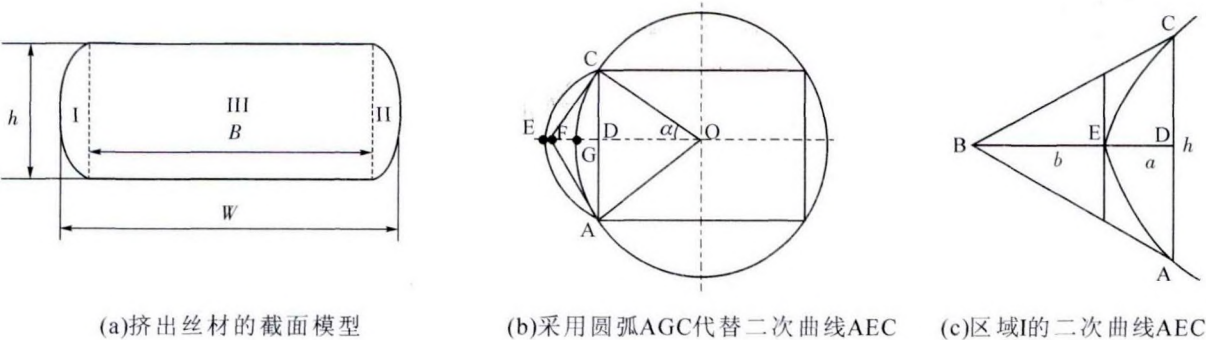


图 8 FDM 喷头 3D 打印的丝宽截面模型
Fig.8 A Model of Wire width Section for FDM spray head 3D Printing

$$W=B+\frac{\pi d^2\nu_r}{4h\nu_s} \quad (10)$$

式中, ν_r 为挤出速度; ν_s 为填充速度; d 为 3D 打印机喷嘴直径; B 为区域 III 中矩形的宽度; h 为分层厚度; W 为挤出丝材的实际宽度。

(2) 当填充速度较大时, 区域 I、II 在丝材中占比较大, 不能忽略, 因为区域 I、II 为对称区域故研究一个区域即可。以 I 为例做以下数学模型的建立, 此时模型为双曲线。用曲线 CGA 来近似代替二次曲线 CEA, 图 7(b) 所示, 从而得到丝材在此时宽度为 I、II、III 区域的宽度之和, 利用上式得到挤出丝材宽度 W 的计算公式为:

$$W=B+2FD=B+2\times\frac{h^2}{2B}=\frac{B^2+h^2}{B} \quad (11)$$

结合上述确定的工艺参数, 通过式(11)计算出该成型工艺参数下的喷头挤出丝材宽度为 0.13 mm, 意味着成型后的叶片型芯制件的尺寸比理论尺寸要多出 0.13 mm, 此结论做后处理的理论依据。

根据以上得到参数在 Cura 软件中进行设置, 使得 Cura 操作软件会根据设置的工艺参数及成型方向对直叶片模型进行分层切片处理, 从而得到成型叶片型芯模型打印层数以及叶片型芯模型成型所用时间和 PLA 材料的消耗量, 并生成成型打印机所用 G 代码, 如图 9 所示。

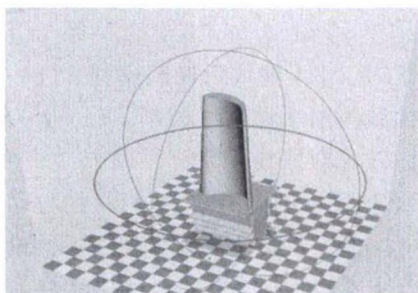


图 9 Cura 软件中叶片型芯的摆放方式
Fig.9 The arrangement of blade core in Cura software

3.6 3D 打印叶片型芯模型实体

根据上述 Cura 操作软件生成的控制 JMT-400 快速成型机对叶片型芯快速成型的相应 G 代码, 对叶片型芯进行“增材制造”, 并得到叶片型芯的实体, 如图 10 所示。

4 叶片型芯模型实体的后处理及测量

利用三坐标测量仪与粗糙度测量仪对成型制件的尺寸精度进行测量, 分别得到相应的测量数据如表 3 和表 4 所示。采用三坐标测量机进行测量测量参数按照 5 行 3 列的测量网格后的测量路径的规划, 进行测量, 详细测量步骤在工艺实验中叙述。从测量数据可以得到, FDM 快速成技术在复杂异形结

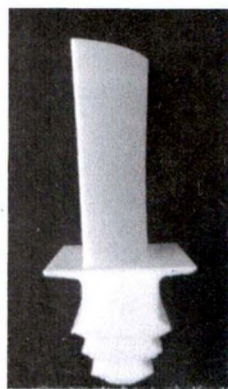


图 10 叶片型芯实体
Fig.10 Blade core entity

表 3 叶轮尺寸精度测量结果

Tab.3 Measurement results of blade dimension accuracy

测点序号 (叶背)	理论与实际距离 d/mm	测点序号 (叶盆)	理论与实际距离 d/mm
1	0.139 944 203	1	0.241 610 430
2	0.143 987 256	2	0.231 715 250
3	0.064 784 335	3	0.110 096 185
4	0.110 700 361	4	0.137 526 034
5	0.144 551 237	5	0.143 505 017
6	0.135 193 861	6	0.112 385 319
7	0.067 056 469	7	0.149 103 488
8	0.193 142 279	8	0.064 154 033
9	0.127 675 722	9	0.094 794 567
10	0.159 878 641	10	0.237 184 675
11	0.094 030 633	11	0.204 965 851
12	0.131 776 098	12	0.115 919 325
13	0.152 944 042	13	0.107 939 103
14	0.118 037 028	14	0.154 755 485
15	0.211 818 814	15	0.162 005 586

表 4 叶轮表面粗糙度测量结果

Tab.4 Surface roughness of impeller

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
实测值/ μm	1.64	1.87	2.14	1.67	2.24	1.56	1.58	2.10	1.40	2.46

构产品的成型精度较高, 其加工精度控制在 0.2 mm 左右, 表面粗糙度在 3 μm 以内, 综合精度可达 IT8。

5 结论

针对发动机叶片这种复杂直纹面在传统数控铣削加工与熔模铸造加工中分别存在的加工成本高与开模周期长问题, 提出一种基于增材制造特性的航空发动机叶片快速成型工艺方法。从增材制造的材料成型特性入手, 通过对喷射丝材成型机理的研究, 从三维模型的预处理、成型零件的快速成型和后处理等 3 个阶段, 分析了成型工艺参数对成型质量与成型效率的作用关系, 并建立了各阶段的优化方案。实验结果表明, 该方法只需传统减材制造的 1/5 周期, 即可加工出精度达 IT8、且表面粗糙度在 3 μm

以下的制品,实现了该类产品的精密高速化制造,同时为实现复杂异型结构产品的快速化制造奠定了理论基础。

参考文献:

[1] Ibrahim GM, Pope K, Muzychka YS. Effects of blade design on ice accretion for horizontal axis wind turbines [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2018, 173: 39-52.

[2] 任远,张成成,高靖云,等. 航空发动机风扇叶片伸根段造型设计与优化[J]. 航空动力学报,2017,32(12): 2825-2833.

[3] Dehouck V, Lateb M, Sacheau J, et al. Application of the Blade Element Momentum Theory to Design Horizontal Axis Wind Turbine Blades [J]. Journal of solar energy engineering-pransactions of the asme, 2018, 140(1): 123-130.

[4] 唐通鸣,张政,邓佳文,等. 基于 FDM 的 3D 打印技术研究现状与发展趋势[J]. 化工新型材料,2015,43(6): 228-230.

[5] 黄亮. 直齿面齿轮电解加工技术研究[D]. 西安:西安工业大学,2017.

[6] 何相之,骆国平,卢涤非. 网格计算在三维 CAD 软件系统的选型与协作中的应用[J]. 计算机时代,2006(4): 3-6.

[7] 耿建光,温小龙,董晓琴. 面向复杂产品设计的 CAD 数据管理[J]. 现代制造工程,2013(10): 29-33.

[8] Xiao Y, Wu XZ, Wang L. Optimal farmland conversion in China under double restraints of economic growth and resource protection[J]. Journal of Cleaner Production, 2016: 17-20.

[9] 邹宗鹏,杨琦,张卉,等. FDM 制品精度主要工艺参数的试验分析[J]. 装备制造技术,2017(10): 66-68.

[10] 杨峰,沈晓红. FDM 快速成型技术及与反求工程的结合应用[J]. 北京工商大学学报(自然科学版),2006(1): 23-26.

[11] 韩善灵,亓涛,李志勇,等. FDM 工艺精度分析与试验研究[J]. 机床与液压,2017,45(23): 90-94.

[12] 王宏松,汪程,修辉平. 模具数字化设计与快速制造[J]. 精密成形工程,2014,6(2): 55-59.

《熔模铸造缺陷图册》简介

《熔模铸造缺陷图册》(简称《图册》)是作者根据自己数十年在生产现场积累的实际经验和知识,参阅了国内外大量资料后精心编著而成的。

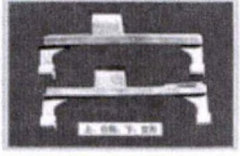
《图册》收录了典型的蜡模(也称“熔模”)缺陷 15 例、型壳缺陷 28 例、铸件缺陷 42 例共 105 幅图片,直观呈现了缺陷,描述了缺陷特征,具体分析了缺陷产生的原因,同时还给出了防止缺陷的有效措施,使读者能从中得到宝贵的资料和启迪,提高解决生产实际问题的能力。

《图册》覆盖面广,适用于中低温蜡料(也称“模料”),水玻璃型壳与硅溶胶型壳,以及碳钢、低合金钢、不锈钢以及高合金钢等铸件。

《图册》参考价值大,附录收集了适用于低温蜡料与水玻璃型壳、低温蜡料与硅溶胶型壳、低温蜡料与复合型壳以及中温蜡料与硅溶胶型壳等四种方案的压制蜡模工艺参数、型壳制造工艺参数。

总之,《图册》图文并茂、通俗易懂,是熔模铸造缺陷分析方面的资料库;可供熔模铸造生产现场、工艺设计、技术服务与研究等方面的人员使用。

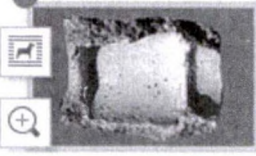
LM-12-12 变形



特征 蜡模在脱模下发生变形的现象。

产生原因	防止措施
1. 蜡模壁厚不均,造成应力分布不均,冷却时收缩不均,造成变形。	1. 严格控制蜡模壁厚,在满足强度前提下,尽量减小壁厚,对于壁厚不均的部位,应进行修磨。
2. 蜡模设计不合理,导致应力集中,造成变形。	2. 改进蜡模设计,避免应力集中,必要时增加加强筋。
3. 蜡模存放时间过长,造成应力松弛,造成变形。	3. 蜡模存放时间不宜过长,存放时应避免阳光直射。
4. 蜡模存放环境湿度大,造成应力松弛,造成变形。	4. 蜡模存放环境应保持干燥,避免湿度过大。
5. 蜡模存放环境温度高,造成应力松弛,造成变形。	5. 蜡模存放环境温度应控制在 10℃ 以下。

XK-04-19 蚊孔



特征 蜡模表面出现蚊孔。

产生原因	防止措施
1. 蜡模表面有油污,造成蚊孔。	1. 蜡模表面应保持清洁,无油污。
2. 蜡模表面有杂质,造成蚊孔。	2. 蜡模表面应进行抛光处理,去除杂质。
3. 蜡模表面有裂纹,造成蚊孔。	3. 蜡模表面应进行修磨处理,去除裂纹。
4. 蜡模表面有气孔,造成蚊孔。	4. 蜡模表面应进行真空处理,去除气孔。
5. 蜡模表面有水分,造成蚊孔。	5. 蜡模表面应保持干燥,避免水分。

ZJ-42-85 夹杂物



特征 蜡模表面出现夹杂物。

产生原因	防止措施
1. 蜡模表面有杂质,造成夹杂物。	1. 蜡模表面应进行抛光处理,去除杂质。
2. 蜡模表面有裂纹,造成夹杂物。	2. 蜡模表面应进行修磨处理,去除裂纹。
3. 蜡模表面有气孔,造成夹杂物。	3. 蜡模表面应进行真空处理,去除气孔。
4. 蜡模表面有水分,造成夹杂物。	4. 蜡模表面应保持干燥,避免水分。
5. 蜡模表面有应力,造成夹杂物。	5. 蜡模表面应进行退火处理,消除应力。

联系人:潘玉洪 13509655192 pyhsz@163.com