

# 异质材料的建模与数字化微滴喷射技术研究

施建平 杨继全 李静波 朱玉芳

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 针对异质材料零件内部的多种材料无序分布且难以表达的问题,提出了一种基于多色距离场的异质材料模型建模方法.利用三维切片软件将该方法所建的异质材料模型进行切片分层得到二维切片数据,依据二维切片数据生成微滴喷射的驱动信号,在此基础上运用数字化微滴喷射技术对异质材料模型进行成型加工,测试结果表明了该建模方法的可行性.

**[关键词]** 异质材料零件,快速成型,多色距离场,数字化微滴喷射

**[中图分类号]** TP204 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2012)01-0010-05

## Study on the Modeling and Digital Micro-Droplet Injection Technology of Heterogeneous Material Part

Shi Jianping, Yang Jiquan, Li Jingbo, Zhu Yufang

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** For the problem of the material distribution disordering inside the heterogeneous part and their difficulty to express, the paper presents a method of modeling heterogeneous materials based on multi-color distance field, and a three-dimensional slicing software is used to slice and layer the heterogeneous materials constructed by the method to obtain two-dimensional slice data. Then the drive signal of spray droplets is generated with two-dimensional slice of data as a basis. Finally, heterogeneous materials parts can be modeled by the digital droplet jetting technology. Testing results show the feasibility of the method.

**Key words:** heterogeneous materials part, rapid prototyping, multi-color distance field, digital droplet jetting

近年来,随着科学技术的发展,对各类零件的性能要求越来越高,在这种情况下,传统制造中用单一的材料构成的零件已难以满足各类近乎苛刻的使用条件.由此人们提出了异质材料零件 HMP(Heterogeneous Material Part)概念.它是指一种零件内部由多种不同的材料连续或非连续分布构成,既有较高的单项指标又有良好的综合性能.通常异质材料可分为 3 类:多材料模型、嵌入零件模型、功能梯度材料模型<sup>[1]</sup>.

异质材料零件的性能通常是由各种材料的比例决定的,因而要根据零件的功能要求进行外部几何形状拓扑和内部材料分布的耦合设计.从大体方面看,异质材料零件的研究涉及两个关键问题:异质材料零件的建模方法和异质材料零件成型方法.在异质材料零件模型建模方法的研究过程中,异质材料零件模型要求其三维 CAD 模型能同时反映其几何信息和材料信息;但是传统的三维 CAD 几何模型只能反映零件的几何信息.为此许多研究者对 CAD 模型的材料信息的表达问题提出了各种解决方案.而快速成型技术的分层制造和材料逐点累加思想,以及利用微滴喷射工艺对各种材料的数字化定点定量地精确喷射技术,从理论上解决了制造出具有任意复杂内部结构的异质零件问题,使得具有复杂内部结构的异质材料零件的直接制造成型成为可能.

## 1 异质材料零件的建模

### 1.1 异质材料建模技术的现状

对于异质材料零件的建模方法,已在 CAD、CAE、CAM、最优化和其他相关领域中开展了大量相关工

收稿日期: 2011-10-26.

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(09KJD460004).

通讯联系人: 杨继全,博士,副教授,研究方向: 快速成型. E-mail: jiquany@126.com

作. 在异质材料零件建模方法的研究过程中, 异质材料零件模型要求其三维 CAD 模型能同时反映其几何信息和材料信息; 但是传统的三维 CAD 几何模型只能反映零件的几何信息. 为此一些研究者对 CAD 模型的材料信息的表达问题进行了研究. Pinghai 等提出了基于 B 样条的建模方法<sup>[2]</sup>; Jacks on 提出了利用有限元网格描述零件几何信息, 用内部有限元单元节点到边界的距离为变量表示材料信息的建模方法; Siu 等提出了基于“梯度源”的建模方法, 模拟异质零件不同组分材料间的扩散现象, 并使用 3DP 工艺制造出模型<sup>[3]</sup>; Biswas 等提出了基于几何域的场建模方法, 提出距离场 (distance field) 来描述实体的材料分布<sup>[4]</sup>; 郑卫国提出了基于材料和结构模板的异质表达方式, 并将其与快速成型中 MEM 工艺的材料堆积路径相对应<sup>[5]</sup>; Sun 等人在复合材料应用背景下, 提出推理布尔运算 (Reasoning Boolean), 在 Unit Cell 模型库支持下, 将不同材料组分、结构的均质单元组合成异质材料<sup>[6]</sup>; Liu 等人针对快速成型中的 3DP 工艺, 提出局部组分控制 (LCC) 及其特征的概念, 将实体划分为一系列四面体单元组成的小区域, 其材料分布由顶点的函数合成来描述<sup>[7]</sup>. 本文提出了一种基于多色距离场模型的异质材料的建模方法, 该方法将零件的体素模型进行数字距离变换得到零件特征的距离场, 并将材料信息通过色彩信息映射零件的材料空间, 形成零件的多色距离场模型, 该建模方法在国内尚处于初步研究阶段.

## 1.2 多色距离场建模

不同于单材料模型的建模, 异质材料模型的建模, 不但要包含几何拓扑信息, 还要包含材料的分布信息. 本文讨论的基于多色距离场的建模方法就可以解决这一问题. 在这种建模方法中, 模型的材料信息将由模型的颜色进行映射, 首先利用三维设计软件或三维反求技术得到物体的几何模型, 然后将其表示成标定的距离场, 其后将模型材料的分布与标定的距离场相匹配, 根

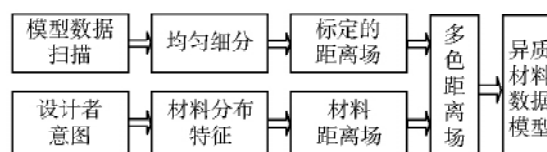


图1 异质材料零件建模流程

Fig.1 Heterogeneous materials part modeling process

据模型材料的特征信息计算出多材料场与标定距离场之间的关系, 并将两者相融合, 之后再便于计算机表示的多色彩场向多材料场进行映射, 就形成了物体的多色距离场的模型<sup>[8-9]</sup>. 建模的过程如图1.

异质材料零件建模的核心问题就是如何将传统的 CAD 技术与材料设计技术有机地结合起来, 能够让用户根据要求对零件的 CAD 几何模型内部赋予材料信息, 从而使异质零件的快速成型成为可能. 为了表征异质材料模型 CAD 几何信息和内部材料信息, 只能描述模型表面属性的传统 CAD 模型已满足不了要求. 本文利用体素化模型的方法来描述模型的内部信息. 模型体素化是指将物体的表面几何形式表示转换成最接近物体形状的体素表示, 产生的数据集不仅包含模型的表面信息, 而且能描述模型的内部信息. 设欧氏空间  $E^3$  中的一个封闭区域  $Q^3$  记为  $f(x, y, z) = \{(x, y, z) \mid (x, y, z) \in Q^3\}$ , 传统 CAD 模型只能描述  $f(x, y, z) = c$  ( $c$  为模型表面所具有的属性值) 的情况, 而体素模型可以解决  $f(x, y, z) \leq c$  (模型内部属性) 的问题. 三维离散空间  $Z^3$  是欧氏空间  $E^3$  的一个子集, 一个三维网格点可以用它的欧氏坐标  $(x, y, z)$  表示, 其 Voronoi 邻域是一个单位立方体, 称为体素, 每个体素的值可以映射到集合  $\{0, 1\}$  上, 赋“1”的体素被称为“黑”体素或“非空”体素; 赋“0”的被称为“白”体素或“空”体素.

此外, 传统的几何空间  $R^3$  已经无法满足异质材料信息描述的要求, 由此延伸出一个向量空间:  $T = R^3 \times M^n$ , 这里  $M^n$  表示  $n$  维材料空间, 材料的矢量表达式为:

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n\}, \quad (1)$$

设  $P_{e_i}$  为零件模型内的一点,  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  为所有模型体素的集合, 该点映射到材料空间中的一点为  $P_{m_i}$ , 且:

$$P_{m_i} = \{m_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}, \quad (2)$$

式中  $m_i$  为定义的基本材料元素, 组成物体的所有材料体积分数之和为 1, 即:

$$\sum_{i=1}^n m_i = 1. \quad (3)$$

则 HMP 模型内的一点可以表示为:

$$P_{t_i} = \{(P_{e_i}, P_{m_i}) \mid P_{e_i} \in R^3, P_{m_i} \in M^n\}. \quad (4)$$

HMP 模型可以定义为:

$$M = \sum_{i=1}^N P_{t_i}. \quad (5)$$

这样就建立了 HMP 模型,但此时模型的 CAD 几何模型与材料信息的相互关系很难直观地表示出来,并且加工时很难进行零件材料信息的处理和传输.本文采用模型的色彩信息来表示模型的材料信息,在用计算机进行信息处理时,模型的每个像素点的材料信息都可以由 24 位 RGB 表示.利用颜色表示模型的材料信息可以表示  $2^{24}$  种材料.

设颜色空间为  $C$ , 矢量表达式为:

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n\}, \quad (6)$$

$n$  为颜色种类,将材料信息映射到颜色信息:

$$P_{m_i} = P_{c_i}. \quad (7)$$

则 HMP 模型内的点基于多色场可表示为:

$$P_{t_i} = \{(P_{e_i}, P_{c_i}) \mid P_{e_i} \in R^3, P_{c_i} \in C^n\}. \quad (8)$$

将模型的材料信息表示成色彩时,方便了信息的处理和传输,如在进行单层打印时,就变成了对单张彩色图片的打印.利用现有的图像打印技术,很容易将异质材料模型逐层打印出来<sup>[10]</sup>.用这种方法将模型的材料信息与几何信息之间的关系转化成了模型色彩与几何信息的关系,就形成了基于多色距离场的异质模型的表示方法.

## 2 异质材料的数字化微滴喷射技术

数字化微滴喷射成型技术是指在数字信号的激励下,利用物理技术的手段,使工作腔内液态材料的一部分在短时间内脱离母体,形成离散的微滴或一段连续的喷射流,并且以一定的响应率和速度从喷嘴喷至指定位置,按照一定序列的逐层系列堆积,形成三维实体零件.目前可用于微滴喷射技术上的材料有各种热塑性塑料、粘结剂、水、石蜡、生物医学材料、低熔点合金和能制成悬浮液的金属颗粒<sup>[11]</sup>.

微滴喷射技术能够达到  $1 \sim 10 \mu\text{m}$  的精度,能够将低粘度的液态材料离散成微米级的微滴,生成的微滴不仅能够按需喷射,而且可以精确的控制喷射微滴的落点.因此,微滴喷射具有强大的成型能力,能够加工高精度结构复杂的模型.

本文所讨论的成型方法是先对基于多色距离场的异质模型进行数据切片,再将切片数据生成数字信号,在数字信号的驱动下,控制打印喷头进行微滴喷射.基于本系统为多材料成型系统,成型件所有切片上各点颜色分布与成型件所需材料分布相对应.在此假定某个模型由  $q$  种不同的材料构成,用一个一维数组  $m$  来表示,则:

$$m = \{r \in [1, q] \mid m_1, m_2, \dots, m_r, \dots, m_q\}. \quad (9)$$

相应的,可以在彩色模型中用一维色彩数组  $c$  来表示这  $q$  种不同的材料:

$$c = \{r \in [1, q] \mid c_1, c_2, \dots, c_r, \dots, c_q\}. \quad (10)$$

相应的,再用一维数组  $n$  表示装有不同材料的  $n$  个喷头,则有:

$$n = \{r \in [1, q] \mid n_1, n_2, \dots, n_r, \dots, n_q\}. \quad (11)$$

式(9)~(11)建立了三维零件材料、多色彩的 CAD 模型和装有异质材料的多喷头之间的相互对应关系,为异质材料的成型建立了基础.

制作异质材料零件时,对于通过逆向工程获得的扫描数据或已经根据设计要求设计出的三维结构 CAD 实体模型,先将模型以单色数据文件的形式导出,通过对其进行材料信息的关联后,上色形成彩色数据文件后,再将彩色数据文件切片分层,得到一系列的二维切片,得出每层的成型信息;计算机根据每一层的成型信息分别控制各机构做协调运动.具体而言,成型开始时,计算机把第一层加工信息发给打印喷头控制电路,打印喷头控制电路根据第一层的材料信息驱动打印喷头中的某个或某几个喷头按该层的形状喷射一种或几种不同的液态材料,随后液体材料或挥发、或迅速固化、或迅速凝固,形成实体区域,在打印喷头中的某些喷头喷射液体成型材料的同时,打印喷头中的另一喷头喷射支撑材料来填充该层未被喷射的区域,迅速凝固后形成支撑区域.随后,计算机把下一层的成型信息传给打印喷头的控制电路喷射出液态成型材料和支撑材料,过程如图 2.如此反复,逐层喷射打印,从而快速地制作出异质材料模型.

加工各切片前,需要由驱动程序通过对计算机表示的 24 位 RGB 信息进行色彩转换和半色调转换,把 RGB 色彩转换成符合喷墨打印的四维 CMYK 模式。加工时,该切片上各像素的色彩值转换成控制打印喷嘴的一系列开/关命令,控制这些喷嘴是否喷射,从而确定喷射特定的材料。将对应像素点上需要喷射的颜色所对应的这个字节中的二进制位设置为‘1’,否则设置为‘0’。

假设某成型件共需要  $q$  种材料,并且被切出  $t$  个切片,每个切片又被计算机分割成  $m$  个像素。如果记喷射控制信号为‘1’,不喷射控制信号为‘0’,则在每个切片中针对各像素,每个喷嘴的控制信号对应着一个  $t \times m$  矩阵。用  $P_1$  表示第一个喷嘴在各层中的控制信号,则

$$P_1 = \begin{pmatrix} x_{111} & x_{112} & \cdots & x_{11m} \\ x_{121} & x_{122} & \cdots & x_{12m} \\ \cdots & \cdots & x_{1ij} & \cdots \\ x_{1t1} & x_{1t2} & \cdots & x_{1tm} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

其中  $x_{1ij}$  表示第一个喷嘴在第  $i$  个切片中针对第  $j$  个像素的控制信号  $i \in [1, t], j \in [1, m]$ , 且  $x_{1ij} = 1$  或 0, 该喷嘴有两种状态打开或关闭。

从而可以得到第  $n$  个喷嘴在各层中的控制信号  $P_n$ 。

$$P_n = \begin{pmatrix} x_{n11} & x_{n12} & \cdots & x_{n1m} \\ x_{n21} & x_{n22} & \cdots & x_{n2m} \\ \cdots & \cdots & x_{nij} & \cdots \\ x_{nt1} & x_{nt2} & \cdots & x_{ntm} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

其中  $x_{nij}$  表示第  $n$  个喷嘴在第  $i$  个切片中针对第  $j$  个像素的控制信号  $n \in [1, s], i \in [1, t], j \in [1, m]$ , 且  $x_{nij} = 1$  或 0。

根据式(13)就可利用矩阵算法生成控制信号,驱动每个喷嘴开或关的动作,配合成型件的模型结构信息,就可快速的进行异质材料的加工。

下图所示为建模的实例,从材料的几何建模、材料信息的融合到最终的加工成型。

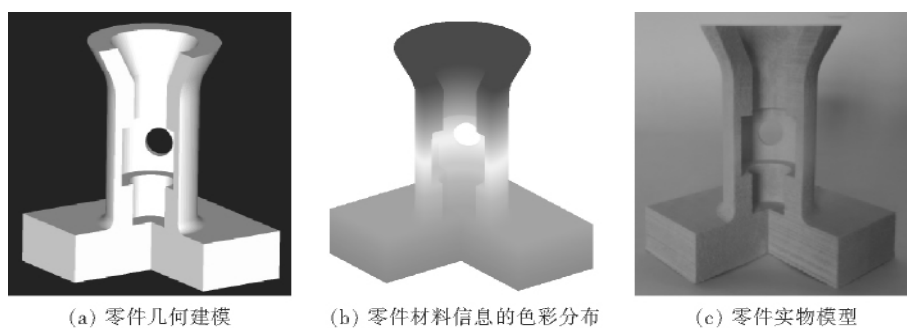


图3 零件的建模实例

Fig.3 Modeling examples of parts

### 3 结论

本文阐述了异质材料模型的材料信息与结构信息的表示方法,采用基于多色距离场的建模方法将模型的材料信息映射成模型的色彩信息,并将模型的材料信息和结构信息离散为二维彩色层片,生成驱动信号控制打印头进行微滴喷射。构建了基于三维打印工艺的数字化微滴喷射技术的异质材料的成型系统。本工艺采用的异质材料的建模和成型方法既可以成型高熔点的金属材料,也可以成型光固化 UV 树脂材料、低熔点材料。该工艺可应用于功能梯度材料、复杂微结构、生物工程等成型加工中。为当今的传统加工和快速成型方法加工异质材料模型提供了一种解决方案。

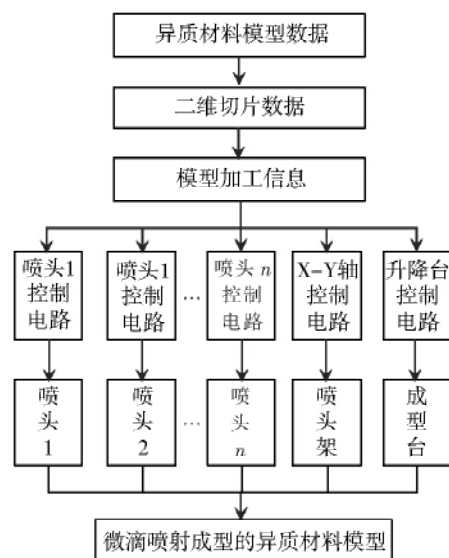


图2 异质材料零件成型过程

Fig.2 Heterogeneous materials part forming

## [参考文献](References)

- [1] 朱玉芳,杨继全,岳东. 多材料模型的数字化喷射成型方法[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(2): 200-204.  
Zhu Yufang, Yang Jiquan, Yue Dong. Digital injecting process of multi-material objects[J]. Mechanical Science and Technology, 2009, 28(2): 200-204. (in Chinese)
- [2] Yang P H, Qian X P. A B-spline-based approach to heterogeneous objects design and analysis[J]. Computer-Aided Design, 2007, 39: 95-111.
- [3] Siu Y K, Tan S T. Source-based' heterogeneous solid modeling[J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(3): 41-55.
- [4] Arpan Biswas, Vadim Shapiro, Igor Tsukanov. Heterogeneous material modeling with distance fields [J]. Computer Aided Geometric Design, 2004, 21(3): 215-242.
- [5] 郑卫国, 颜永年, 熊卓. 复合材料梯度结构组织工程支架建模方法[J]. 材料导报, 2002, 16(11): 9-13.  
Zheng Weiguo, Yan Yongnian, Xiong Zhuo. Method for modeling multiple material tissue engineering scaffolds with graded structures[J]. Materials Review, 2002, 16(11): 9-13. (in Chinese)
- [6] Kou X Y, Tan S T. Heterogeneous object modeling: A review[J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(2): 284-301.
- [7] Liu H, Maekawa T, Patrikalakis N M, et al. Methods for feature-based design of heterogeneous solids [J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(12): 1141-1159.
- [8] Zhou Hongmei, Liu Zhigang, Lu Bingheng. Heterogeneous object modeling based on multi-color distance field[J]. Materials and Design, 2008, 30(2): 939-946.
- [9] 吴晓军, 刘伟军, 王天然, 等. 距离场定义下异质材料 CAD 信息建模方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(2): 313-318.  
Wu Xiaojun, Liu Weijun, Wang Tianran, et al. Heterogeneous material CAD part modeling under distance field definition [J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2005, 17(2): 313-318. (in Chinese)
- [10] 夏俊, 杨继全. 彩色三维打印机控制系统的开发[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2009, 9(2): 8-12.  
Xia Jun, Yang Jiquan. Development of control system of color three-dimensional printer[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2009, 9(2): 8-12. (in Chinese)
- [11] 吴任东, 魏大忠, 周浩颖, 等. 三维数字微滴喷射成形技术的发展现状[J]. 新技术新工艺, 2004, 8(2): 35-37.  
Wu Rendong, Wei Dazhong, Zhou Haoying, et al. The development of 3D digital micro-droplet jetting forming[J]. New Technology and New Process, 2004, 8(2): 35-37. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]