

多材料零件三维打印建模可视化研究

葛正浩*, 陈浩**, 雷聪蕊

陕西科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 随着三维(3D)打印零件的个性化定制与特殊功能化日益发展,单一材质的 3D 打印零件已经无法满足实际工况要求,多材料零件 3D 打印技术已经成为快速成型行业的研究热点。目前多材料零件 3D 打印的关键技术之一是其建模问题。首先,提出一种基于控制点的梯度源建模方法。该方法在几何建模中认为几何模型均是由空间中的点所组成,在材料建模中以“梯度源”建模思想按照材料组分梯度变化公式对多材料零件进行颜色渐变表示。接着,利用 VS2013 和 OpenGL 编程语言对单梯度源零件进行可视化建模表示与分析。最后,在单梯度源建模基础上,引入运算符“ \otimes ”对两种不同梯度源进行加权运算,对三种材料零件进行可视化建模表示与分析。所提建模方法经光学加工技术制造出的多材料零件,能够较好地避免在多材料零件中材料成分急剧变化,从而引起应力集中与热失效等不良效果。

关键词 激光光学; 多材料零件建模; 控制点; 梯度源; 可视化研究; OpenGL

中图分类号 TH164 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.231403

Research on Three-Dimensional Printing Modeling Visualization of Multi-Material Parts

Ge Zhenghao*, Chen Hao**, Lei Congrui

*College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology,
Xi'an, Shaanxi 710021, China*

Abstract As the booming of personalized customization and special functions of three-dimensional (3D) printed parts, single material 3D printed parts can no longer meet the demand of actual working conditions, and 3D printing technology of multi-material parts has become a research hotspot in the rapid prototyping industry. Modeling is one of the key technologies for 3D printing of multi-material parts. In this paper, first, a method of gradient source modeling based on control points is proposed. In geometric modeling, this method considers that spatial geometric models are composed of points in space, and in material modeling, and the idea of “gradient source” is used to represent multi-material parts with color gradient according to the formula of material component gradient change. Then, VS2013 and OpenGL programming languages are used for visual modeling representation and analysis of single gradient source parts. Finally, on the basis of single-gradient source modeling, two different gradient sources are weighted by using operation symbol “ \otimes ”, and three kinds of material parts are presented and analyzed visually. The multi-material parts manufactured by the proposed modeling method by optical processing technology can well avoid adverse effects such as stress concentration and thermal failure caused by the rapid change of material composition in the multi-material parts.

Key words laser optics; multi-material parts modeling; control points; gradient source; visualization research; OpenGL

OCIS codes 140.3380; 140.3390; 160.6990

收稿日期: 2020-07-24; 修回日期: 2020-08-24; 录用日期: 2020-08-31

基金项目: 陕西省重点研究项目(2019GY-096)

* E-mail: h15332565288@sina.com; ** E-mail: 406442328@qq.com

1 引言

三维(3D)打印技术在制造原理上与传统的数控机床(CNC)减材制造技术、铸造等不同。3D打印技术在零件内部进行堆叠制造,且多材料零件的制造难度大大高于单质材料零件。随着3D打印零件的个性化定制与特殊功能化日益发展,单一材质的3D打印零件已经无法满足实际工况要求,多材料零件3D打印研究已经成为当今热点之一。多材料零件的特点是材料相和材料组分是非均匀变换的,是空间上不同材料成分或结构的零件。典型的多材料构件有:微机电系统、多孔材料结构、微型传感器、彩色模型以及组织器官等^[1]。多材料零件3D打印技术需要对多材料零件内部点、线、面上的材料分布进行控制制造,对零件结

构与材料分布进行并行一次制造。多材料零件建模时需要将异质性引入设计领域,从而使制造出的多材料零件获得异质特点,但当前的实体建模软件不能从本质上表示零件的属性信息(如材质、物理特性等)。因此,多材料零件3D打印的关键技术之一是其CAD建模问题。

2 多材料零件建模研究

2.1 多材料零件建模设计

多材料零件建模信息流程如图1所示。为了设计出多材料零件模型,首先设计师需要对材料成分和几何结构进行初步设计,接着在计算机上进行几何信息与材料信息的表示,最后可视化表示出非均匀模型,并执行分析。若可视化结果不满意,可修改几何信息与材料信息,直到获得最佳设计。

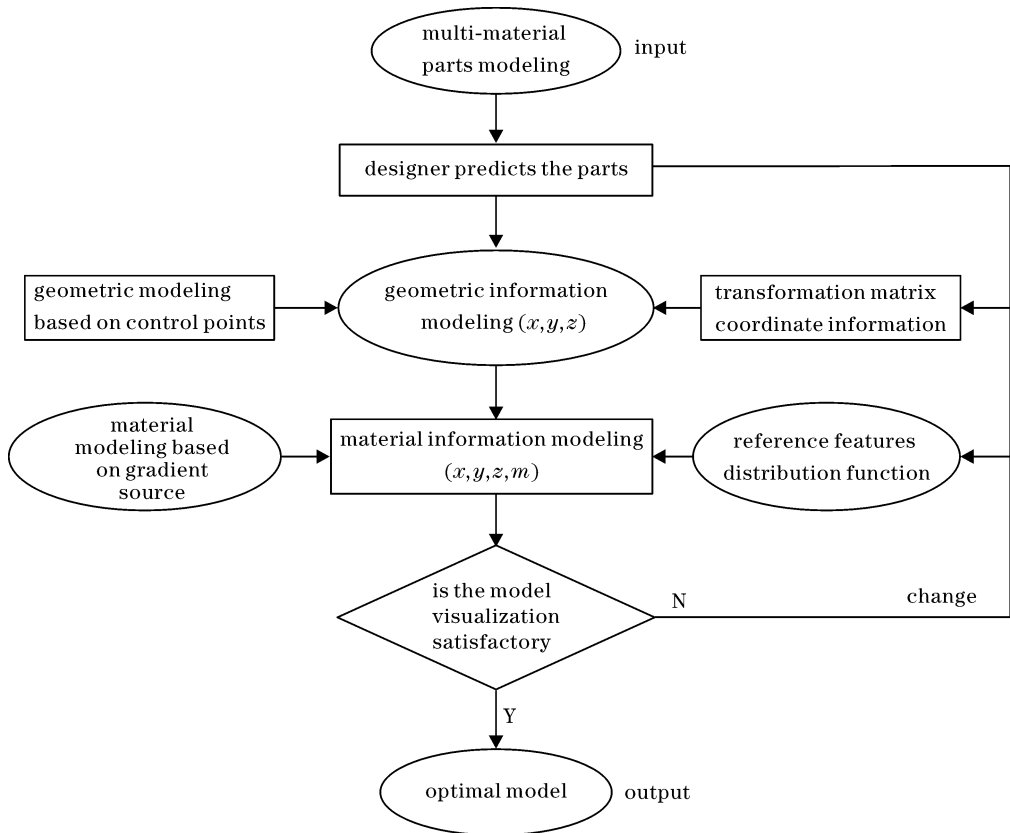


图1 多材料零件建模信息流程图

Fig. 1 Multi-material part modeling information flow chart

在多材料零件建模研究中,已经有许多学者进行了深入研究。主流的多材料零件模型表示方法有:基于有限元模型^[2]、基于体素模型^[3]、基于分解模型^[4](如细胞分解模型)等。但这些模型表示方法具有以下缺陷:1)基于有限元模型与基于体素模型需要网格生成和体素化。这种转换表示的建模方法不仅计算

成本高,还会引入误差,并且需要较大的储存空间。2)近似表示物体几何轮廓与材料组分,会造成信息表面特征的丢失,不便于CAD系统之间的数据交换。3)基于分解模型需要将内部分解成几个更简单的子区域,可能在零件接口处生成冗余实体,导致多材料零件模型无法光滑连续表示。4)以上表示方法几

乎无法修改和控制材料模型,因为每一次改变都可能需重新计算材料特征的分布。

为了克服现有表示方法的困难,本文提出一种基于控制点的梯度源建模方法。基于控制点的模型可以看作参数曲线、曲面和体积的直接扩展,每个控制点都包含了额外的材质信息,在几何和材质表示上都很紧凑,给定参数坐标 (x, y, z, m) ,可以有效地查询点的材料组成。此外,该模型可以有效地表示复杂的(二维或三维)材料分布,同时几何和材料定义的局部修改也很简单。

2.2 多材料零件建模表示

2.2.1 基于控制点的几何表示

传统的三角面片网格模型表示不仅记录了点的信息,而且记录了点和点之间的连接关系^[5]。因此在处理多边形模型的连接关系时变得异常复杂,网格光栅化操作效率十分低下。而基于控制点来表示物体模型最大的好处在于仅需要点的位置信息,从而避免了对网格模型中的复杂连接和拓扑一致性等关系的处理。基于控制点的几何建模方法,空间位置信息和材质属性信息很容易在对应点的基础上进行修改。使设计者对多材料零件设计的灵活性与创造性大大增加。

基于控制点的多材料零件建模方法将材质信息分配给对象中的每个点,使得空间中点 P 表示为 (x, y, z, m) 。其中, (x, y, z) 为 P 点的空间几何位置信息, m 表示 P 点的材质属性信息。通过直径极小的球来表示实体的思想,认为空间实体均可以由点、线、面、体构成。对于线、面、体的构造方式可以通过点的移动、缩放、旋转等操作来构造。移动矩阵 T 、缩放矩阵 S 、旋转矩阵 R 、透视变换矩阵 F 、正投影矩阵 O ,分别表示为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$S = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$F = \begin{bmatrix} \frac{2h}{r-l} & 0 & \frac{r+l}{r-l} & 0 \\ 0 & \frac{2h}{t-b} & \frac{t+b}{t-b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-(f+h)}{f-h} & \frac{-2fh}{f-h} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$O = \begin{bmatrix} \frac{2h}{r-l} & 0 & 0 & -\frac{r+l}{r-l} \\ 0 & \frac{2}{t-b} & 0 & -\frac{t+b}{t-b} \\ 0 & 0 & \frac{-2}{f-h} & -\frac{(f+h)}{f-h} \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中:移动矩阵 T 沿着 x, y, z 轴平移 a, b, c 的距离;缩放矩阵 S 将图形缩放1倍;旋转矩阵 R 绕着 y 轴旋转角度 θ ;透视变换矩阵 F 与正投影矩阵 O 中, $l \neq r, t \neq b, h \neq f$ 。

综上分析基于控制点几何建模,利用VS2013与OpenGL调用函数表示由点 $P(x, y, z)$ 绕 y 轴生成三维实体程序如下。

```
Point rotate Matrix With Factor(Point pnt,
double angle,double factor)// rotate around y;
{
    Point new Point;
    new Point. x = factor*(pnt. x*cos(angle)
+pnt. z*sin(angle));
    new Point. y = factor*pnt. y;
    new Point. z = factor*( pnt. z*cos(angle)
-pnt. x*sin(angle));
    return new Point;
}
```

2.2.2 梯度源材质表示

在欧几里德空间 E^3 中, A^3 是有界物体的几何表示: $A^3 = \{x \in E^3 \mid x \text{ in the object}\}$ 。Kumar等^[6]引入了物质空间的概念,表示点 P 空间位置的同时还表示材质信息。物体中的每个点都可以被建模为点 $P(P_g \in A^3, P_m \in V^m)$,其中, P_g 表示几何位置, P_m 表示材质信息, V^m 表示材料空间的维数。如图2材料分布示意图所示,当 $m=3$ 时,空间中的一点 P 存在三种材料, $P_m \in (0.5, 0.3, 0.2)$,则表示该点的材料分布为50%、30%、20%,且三种材料组分之和为1。

点 P 的材料分布函数表示为

$$\sum_i^m M_i = 1, i = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$$

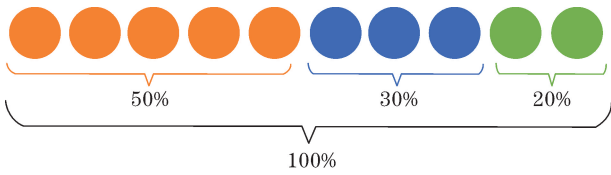


图2 材料分布示意图

Fig. 2 Material distribution diagram

在多材料零件模型中,某点 P 的函数表示为 $P_{g,m} = \{(P_{gi}, P_{mi}), i = (1, 2, 3, \dots, n)\}$. (7)

Siu 等^[7]提出梯度源思想,将空间中的点 P 到梯度源(参考特征)的最小距离 d 作为自变量来设计材料分布函数,用距离函数 $f(d)$ 来表示物质组成。图3为不同参考梯度源的多材料模型图,参考特征可以是点、线、面。设计师可以通过修改几何形状、参考特征以及材料分布函数达到理想的设计模型。图4为不同材料分布函数表示的材料分布图,材料分布函数可以是线性或非线性。

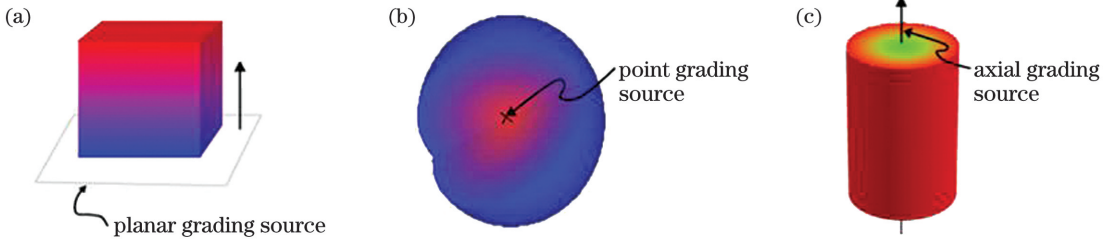


图3 不同参考梯度源的多材料模型图。(a)参考特征为平面;(b)参考特征为点;(c)参考特征为线

Fig. 3 Multi-material model diagrams for different reference gradient sources. (a) Reference feature is plane; (b) reference feature is point; (c) reference features is line

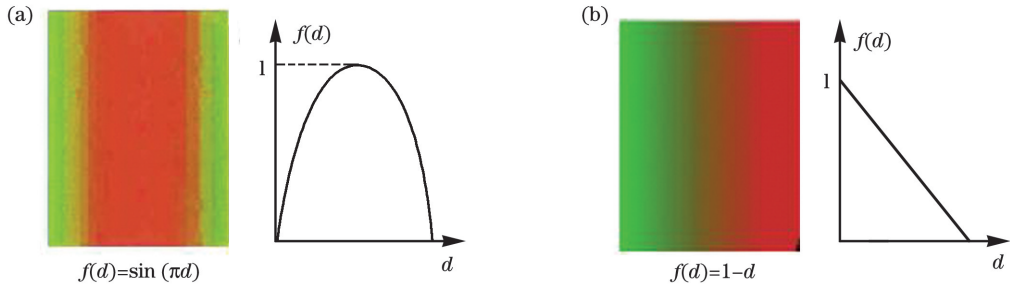


图4 不同材料分布函数表示的材料分布。(a) $f(d) = \sin(\pi d)$; (b) $f(d) = 1 - d$

Fig. 4 Material distribution represented by different material distribution functions.

(a) $f(d) = \sin(\pi d)$; (b) $f(d) = 1 - d$

由图4(b)可知,功能梯度材料存在材料分级现象,材料分级发生在零件材料组成的两端,可以用 M_S 和 M_E 分别表示分级材料的开始端和结束端。在 M_S 和 M_E 之间储存的是混合的功能梯度材料,且材料分级满足如下公式,

$$\sum_{i=1}^m M_{Si} = 1, \sum_{i=1}^m M_{Ei} = 1, \quad (8)$$

式中: M_{Si} 为第 i 个材料组成数组 M_S ; M_{Ei} 为第 i 个材料组成数组 M_E ; m 为材料的个数。

由此可以推出在功能梯度材料模型中点 P 的材料体积分布为

$$\mathbf{V}_{Pi} = \begin{bmatrix} V_{P1} \\ V_{P2} \\ \vdots \\ V_{Pi} \end{bmatrix} = f(d) \times \begin{bmatrix} M_{E1} - M_{S1} \\ M_{E2} - M_{S2} \\ \vdots \\ M_{Ei} - M_{Si} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{S1} \\ M_{S2} \\ \vdots \\ M_{Si} \end{bmatrix}, \left\{ \begin{array}{l} M_{Si} \in M_S \\ M_{Ei} \in M_E \\ 0 \leq f(d) \leq 1 \end{array} \right\}. \quad (9)$$

进而可以推导出功能梯度材料零件的体积表示为

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{V}_{Pi} = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} V_{P1} \\ V_{P2} \\ \vdots \\ V_{Pi} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n f(d) \times \begin{bmatrix} M_{E1} - M_{S1} \\ M_{E2} - M_{S2} \\ \vdots \\ M_{Ei} - M_{Si} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{S1} \\ M_{S2} \\ \vdots \\ M_{Si} \end{bmatrix}, \left\{ \begin{array}{l} M_{Si} \in M_S \\ M_{Ei} \in M_E \\ 0 \leq f(d) \leq 1 \end{array} \right\}, \quad (10)$$

式中: n 为组成功能梯度模型的点。

基于控制点的梯度源建模利用空间插值思想表示空间一点 P 位置信息与材质信息,图 5(a)为直线段中各点信息表示图,在直线段两端代表两种材料的起始与终止。在直线段中从一个端点 $P_S(X_S, Y_S, Z_S, M_S)$ 到另一个端点 $P_E(X_E, Y_E, Z_E, M_E)$ 具有线性梯度材料的非均质线,点 $P(X, Y, Z, M)$ 为线段上任意一点, P 点的位置可表示为

$$P = (1-t)P_S + tP_E, t = d/D,$$

$$d = \sqrt{(x - x_S)^2 + (y - y_S)^2 + (z - z_S)^2},$$

$$D = \sqrt{(x_E - x_S)^2 + (y_E - y_S)^2 + (z_E - z_S)^2}, \quad (11)$$

式中: d 为 P 点到起始点 P_S 的距离; D 为点 P_S 和

P_E 之间的距离; $t \in (0 \sim 1)$ 。

图 5(b)为 B 样条曲线中各点信息表示图,非均匀 B 样条曲线上点 $P(X, Y, Z, M)$ 的表示相比于直线较复杂:

$$\begin{cases} P(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)P_i \cdot N_{i,0}(u) = 1, \\ u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i}N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}}N_{i+1,p-1}(u) \end{cases} \quad (12)$$

图 5(c)为简化 B 样条曲线图,取一段简化 B 样条曲线做数学描述:

$$P = (1-t)2P_S + 2t(1-t)P_0 + t_2P_E. \quad (13)$$

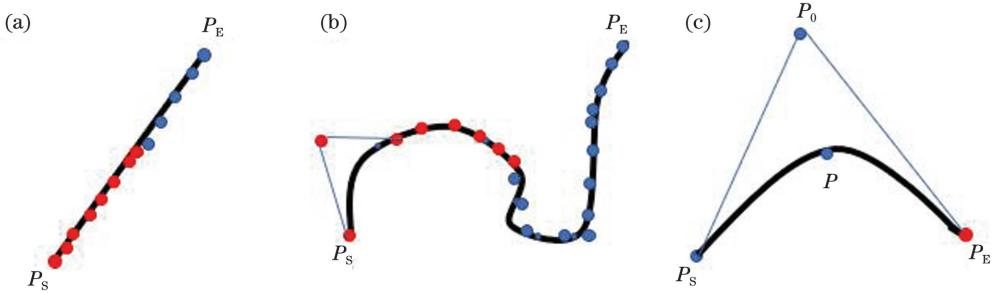


图 5 线段中某点 P 的几何与材质信息。(a)直线段中各点信息表示;(b) B 样条曲线中各点信息表示;(c)简化 B 样条曲线
Fig. 5 Geometric and material information of a point P in the line segment. (a) Information representation of each point in the line segment; (b) information representation of each point in the B-spline curve; (c) simplified B-spline curve

3 实例建模与可视化分析

3.1 实例建模

根据上述基于控制点的梯度源建模方法,在 VS2013 与 OpenGL 函数库编程环境下,根据文中基于控制点的几何建模研究与梯度源的材料建模思想,对功能梯度材质的圆台模型进行实例建模,如图 6(a)所示。在空间中,起始点 $P_S(0, 0, 1)$ 与终止点 $P_E(2, 1, 1)$ 的线段,参考梯度源取起始点 P_S 。在 $P_S - P_E$ 之间的点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 以插值方式计算线段上点 P 的几何信息与材质信息。主要程序表示为

```
#include <stdio.h> //Header file Settings
#include <stdlib.h>
#include <string>
#include "Utils.h"
#include <iostream>
Point rotate Matrix With Factor(Point pnt,
double angle, double factor)
// rotate around y;
```

```
{
Point new Point;
new Point. x=factor*(pnt. x*cos(angle)+
pnt. z*sin(angle));
new Point. y=factor*pnt. y;
new Point. z=factor*( pnt. z*cos(angle)-
pnt. x*-sin(angle));
return new Point;
}
glBegin(GL_POINTS);
//Material modeling based on gradient source
{
double?
D=sqrt(
(end. x-start. x)*
(end. x-start. x)+
(end. y-start. y)*
(end. y-start. y)+
(end. z-start. z)*
(end. z-start. z)
);
```



```

//Calculate the distance between the starting
point and the ending point
for (double d=0; d <=D; d=d+0.01)
double t = d / D; // Material distribution
function
pnt. x = (1 - t) * xs + t * xe; // Calculate the
geometric information of each point
pnt. y=(1-t)*xy + t*xy;
pnt. z=(1-t)*xz + t*xz;
R=(1-t)*m1[0] + t*m2[0]; //Calculate
material information of each point
G=(1-t)*m1[1] + t*m2[1];
B=(1-t)*m1[2] + t*m2[2];
}
for (double angle=0.0; angle <= TWO_PI;
angle=angle+0.01)
{
for (double factor = 0; factor < 1.0;
factor+=0.01)
{
Newpnt=pnt;
Point temp;
Newpnt = rotate Matrix With Factor (pnt,
angle, factor);
glColor3f(R, G, B);
glVertex3f(Newpnt. x, Newpnt. y, Newpnt. z);
}
gluLookAt
//Model observation position setting
mSceneCamera -> position. x, mSceneCamera
->position. y, mSceneCamera->position. z,
mSceneCamera -> target. x, mSceneCamera
->target. y, mSceneCamera->target. z,
mSceneCamera -> up. x, mSceneCamera
->up. y, mSceneCamera->up. z);
myDisplay2();
UnsetRenderStates ();
}

```

该程序中： D 表示起始点与终止点之间的距离； d 表示线上某点到初始点的距离；起点 P_s 为梯度源； $P(x, y, z)$ 表示线上各点的坐标值； R, G, B 表示线上各点材料组分。

功能梯度材料 (FGM) 模型按照材料组分梯度

变化公式进行颜色渐变表示。图 6(a) 为根据上述程序编译出的功能梯度材料圆台。图 6(b)~(e) 为基于控制点的梯度源建模方法建立的多材质模型，通过修改变换矩阵以及不同坐标值，可以高效方便地构造出不同结构的功能梯度模型。通过修改梯度源参考特征可以改变材料特征。图 6(f) 所示为梯度源参考特征为圆锥中心轴的 FGM 圆锥体。图 6(g) 所示为梯度源参考特征为底面的 FGM 正方体。

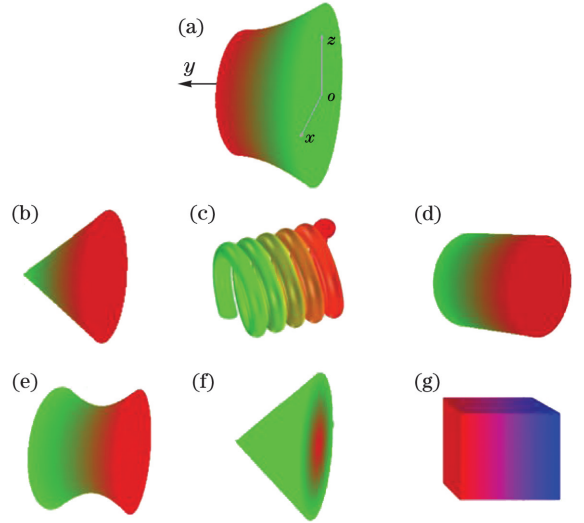


图 6 功能梯度零件可视化模型范例图。(a) FGM 圆台模型；(b) FGM 圆锥模型；(c) FGM 弹簧模型；(d) FGM 圆柱模型；(e) FGM 圆台模型；(f) 梯度源为中心轴的 FGM 圆锥模型；(g) FGM 正方体模型

Fig. 6 Example diagram of functional gradient parts visual model. (a) FGM round table model; (b) FGM conical model; (c) FGM spring model; (d) FGM cylindrical model; (e) FGM round table model; (f) FGM conical model with gradient source as central axis; (g) FGM cube model

3.2 单梯度源模型可视化分析

关于多材料物体设计的一个重要问题是组成材料在制造过程中是否完全混合并完全合金化，在文献[8]中表示 Cu-Ni 二元体系是完全可熔的。如图 7(a) 所示，以 Cu-Ni 混合材质的功能梯度圆台进行可视化分析。假设最左端材料为体积分数 100% 的铜。最右端材料为体积分数 100% 的镍。梯度源的变换规律如下：初始材料为 $M_s = [R \ G \ B] = [1 \ 0 \ 0]$ (左端代表 Cu)；终止材料为 $M_e = [R \ G \ B] = [0 \ 1 \ 0]$ (右端代表 Ni)。

由于圆台模型为类似于圆曲面。梯度源参考可以选取圆台中心线上的某点，此类梯度源满足

直线方程: $x - x_0 = y - y_0 = z - z_0$, 其中 (x_0, y_0, z_0) 表示直线上的点。材料体积分数为 100% 的铜与材料体积分数为 100% 的镍之间梯度变换函数为 $f(d) = d/H$, 且梯度源的有效变换距离 $H = 50$ mm。图 7(b) 为 Cu-Ni 材料沿梯度源方向上的

材料分布图, 将圆台在高度方向上等切为 9 段, 1~9 段的材料按照梯度变换函数分布, 且在某一段中两种材料的体积分数总和为 100%。如图 7(b) 所示第 3 段中材料体积分数为 70% Cu + 30% Ni。

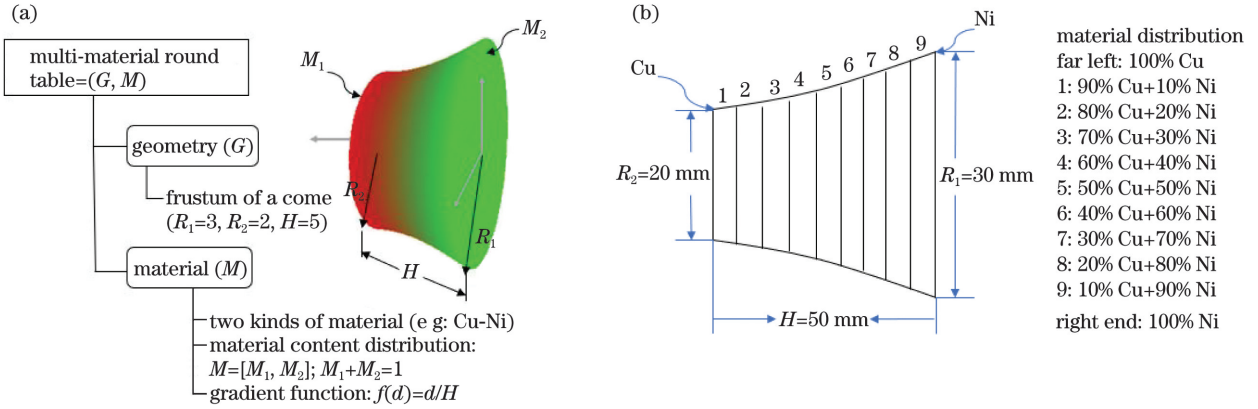


图 7 功能梯度模型可视化分析。(a) FGM 圆台模型参数分析; (b) 沿梯度源方向上的材料分布

Fig. 7 Visual analysis of functional gradient model. (a) Parameter analysis of the FGM round table model; (b) material distribution along the gradient source direction

4 多梯度源模型可视化分析

本文所提出的建模方案通过连续控制零件内部组成和细微结构变化, 使两种材料之间不出现明显界面。有助于避免某些不同固体(如金属和陶瓷)材料成分的急剧变化所产生的严重应力集中与热失效现象。但在特殊工况中, 单梯度源的功能梯度材质零件可能无法满足实际要求。多梯度的模型可以在一个零件模型上表示多种材质信息, 在实际工况中能完美地胜任多种极端任务。如航空航天领域所使用的耐热管, 在径向方向上使用金属与陶瓷的功能梯度材料, 不仅具有良好的耐热性, 还具有良好的综合机械强度。在高度方向上可以采用两种金属的功能梯度材料, 进一步加强耐热管的性能。

通过 VS2013 与 OpenGL 编程语言表示出了双梯度源功能梯度材质零件的建模, 如图 8(a)~(c) 所示。以图 8(a) 为例, 有两个梯度源的功能梯度材料圆锥模型, 分别是圆锥的底面与圆锥中心轴。其中 FGM 圆锥的底面梯度源控制圆锥在高度方向的材质变化(从左到右)。中心轴梯度源控制圆锥径向的材质变化(从内到外)。两个梯度源对功能梯度零件并非相互独立, 如圆锥顶点材质由底面梯度源与中心轴梯度源的材质信息共同作用。如图 9(d) 所示, 对双梯度源圆锥进行可视化分析。模型中使用的材料总数为 $3(n=3)$, 并建立了 2 个梯度源, 梯度

源参考分别为圆锥中心线 A 和圆锥底面 B。圆锥的几何参数如图 9(a) 所示, 底面半径为 r , 高为 h 。

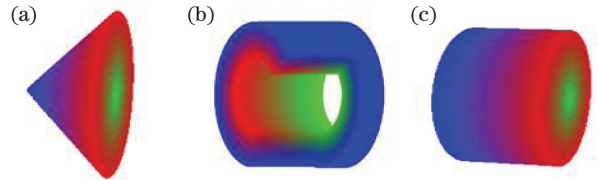


图 8 多梯度源可视化模型。(a) 多梯度源圆锥模型; (b) 多梯度源空心圆柱模型; (c) 多梯度源圆柱模型

Fig. 8 Multi-gradient source visualization model. (a) Multi-gradient source cone model; (b) multi-gradient source hollow cylinder model; (c) multi-gradient source cylindrical model

1) 参考梯度源为圆锥中心线 A 时:

① 梯度源参考为圆锥中心轴 A, 如图 9(a) 所示;

② 材料梯度函数为 $f(d_1) = \frac{d_1}{r}$;

③ 材料组成成分为 M_S 和 M_E , 如图 9(b) 所示, 初始材料为 $M_S = [R \ G \ B] = [0 \ 1 \ 0]$ (内侧代表材料 1), 终止材料为 $M_E = [R \ G \ B] = [1 \ 0 \ 0]$ (外侧代表材料 2);

④ 加权比为 $k_1 = 0.5$ 。

2) 参考梯度源为圆锥底面 B 时:

① 梯度源参考为圆锥底面 B, 如图 9(a) 所示;

② 材料梯度函数为 $f(d_2) = \frac{d_2}{h}$;

③材料组成成分为 M_S 和 M_E ,如图 9(c)所示; 初始材料为 $M_S=[R \ G \ B]=[1 \ 0 \ 0]$ (右端代

表材料 2), 终止材料为 $M_E=[R \ G \ B]=[0 \ 0 \ 1]$ (左端代表材料 3);

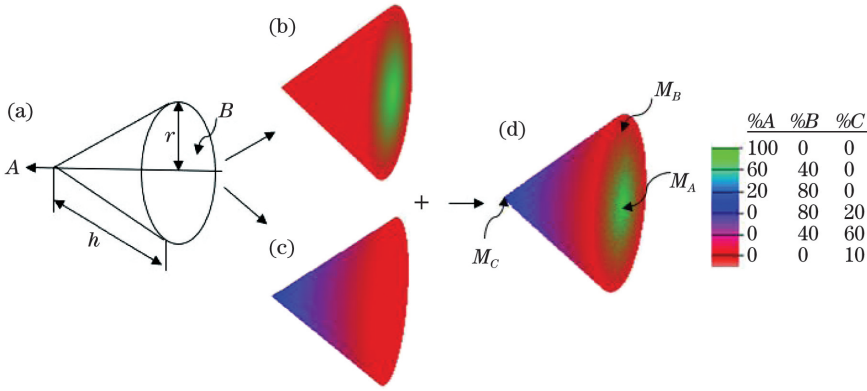


图 9 双梯度源圆锥可视化分析图。(a)圆锥参数信息;(b)以中心轴 A 为梯度源的单梯度源圆锥;(c)以底面 B 为梯度源的单梯度源圆锥;(d)双梯度源圆锥模型

Fig. 9 Visual analysis diagram of double-gradient source cone. (a) Conic parameter information; (b) single-gradient source cone with central axis A as the gradient source; (c) single-gradient source cone with bottom B as the gradient source; (d) double-gradient source cone model

④加权比为 $k_2=0.5$ 。

通过控制分级源的权重比,可以实现对分级源的控制和抑制。在建模过程中,多材料模型可能不止两个梯度源。多梯度源运算公式可以表示为

$$M_1 \otimes M_2 \otimes \dots \otimes M_n = \frac{k_1 B_1 + k_2 B_2 + \dots + k_n B_n}{\sum_{i=1}^n k_i}, \quad (14)$$

式中: k_i 是梯度源的加权比; B_n 是梯度源的材料分布; n 是梯度源数量。

根据上述信息,使用运算符号“ \otimes ”对两种不同梯度源进行加权运算,得到如图 9(d)所示的双梯度源圆锥模型。

以上示例展示了复杂工况的多梯度源零件建模过程,完成了多个梯度源(多种材料)的可视化表示。本文所提建模方法能够较好地避免在同一零件中不同类型材料成分的急剧变化,从而避免材料界面区域的严重应力集中与热失效等不良效果。在制造多材质零件模型时,可以采用选择性激光烧结技术(SLS)^[9]、选择性激光熔化技术(SLM)^[10]、电子束熔化技术(EBM)^[11]等多种比较成熟的 3D 打印技术对多材质零件进行制造。其中,SLS 与 SLM 的能量源为激光,以光纤激光器^[12]为热源的多材质增材制造能够实现较高自由度材质调控,制造出的零件精度高,力学性能好。EBM 的能量源为电子束,能够对材料组分灵活把控,同时具有高效特点。此外,上述光学加工技术制造出的多材质零件,通过 X

射线扫描电镜能量色散分析仪进行微观结构分析,可以进一步通过光学技术验证本文所提建模方法的可靠性^[13]。

5 结 论

基于控制点的表示在一些特殊应用中被证明是多边形网格表示的一种有价值的替代方法^[14]。特别是当需要处理高度复杂或动态模型且不一定需要适当的曲面拓扑时,基于控制点表示是一种更简单、更有效的算法。从以上实例研究可以看出,基于控制点的梯度源建模方法更加简单、灵活。设计师可以通过改变几何变换矩阵灵活地修改模型几何特征,然后应用不同的材料混合函数(线性或非线性函数)来模拟材料的非均匀性。通过改变不同的参考梯度源可以有效地修改零件中材料分布。本文还研究了可以胜任多种复杂工况的多梯度源建模(3 种材料),增加了设计时对多材料零件建模的直观性、灵活性,并且可以应用于立体光固化成型(SCL)和熔融沉积成型技术(FDM)的多材料 3D 打印技术,为多材料零件 3D 打印的设计与制造做出有效贡献。未来,可以通过自适应对象空间采样技术,利用点作为通用三维图形基础的独特优势,对更为复杂的零件进行多材料零件建模,以减少设计者空间离散的难度。

参 考 文 献

[1] Lu B H. Additive manufacturing: current situation

- and future[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 19-23.
- 卢秉恒. 增材制造技术: 现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19-23.
- [2] Wang S, Chen NF, Chen C S, et al. Finite element-based approach to modeling heterogeneous objects [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2009, 45(8/9): 592-596.
- [3] Watanabe I, Yamanaka A. Voxel coarsening approach on image-based finite element modeling of representative volume element [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 150: 314-321.
- [4] Todd R J. Analysis of functionally graded material object representation methods [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [5] Liu N. Research on direct visibility testing and shadow rendering for point-based models [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011.
- 刘楠. 点集模型的直接可见性测试与阴影绘制技术研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- [6] Kumar V, Dutta D. An approach to modeling & representation of heterogeneous objects [J]. Journal of Mechanical Design, 1998, 120(4): 659-667.
- [7] Siu Y K, Tan S T. 'Source-based' heterogeneous solid modeling [J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(1): 41-55.
- [8] Jia L, Xu J, Li S F, et al. Reaction kinetics of Cu-Ni and B₂C in Cu-Ni alloy under solid-state sintering[J]. Materials Science and Technology, 2020, 36(6): 759-764.
- [9] Xie R D, Zhu J W, Zhang H, et al. Review of detection, analysis and control of temperature field in laser additive manufacturing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050003.
- 解瑞东, 朱尽伟, 张航, 等. 激光增材制造温度场检测分析与控制综述[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050003.
- [10] Yao Y S, Wang J, Chen Q B, et al. Research status of defects and defect treatment technology for laser additive manufactured products [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 100004.
- 姚燕生, 汪俊, 陈庆波, 等. 激光增材制造产品缺陷及其处理技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 100004.
- [11] Pu Y S, Wang B Q, Zhang L G. Metal 3D printing technology[J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 78-84.
- 蒲以松, 王宝奇, 张连贵. 金属3D打印技术的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 78-84.
- [12] Yang Y Q, Wu S B, Zhang Y, et al. Application progress and prospect of fiber laser in metal additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500012.
- 杨永强, 吴世彪, 张越, 等. 光纤激光器在金属增材制造中的应用进展及展望[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500012.
- [13] Liu Z Q, Xu G J, Ma R X, et al. Properties of TiAl alloy prepared by additive manufacturing with laser coaxial powder feeding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302016.
- 刘占起, 徐国建, 马瑞鑫, 等. 激光同轴送粉增材制造 TiAl 合金的性能[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302016.
- [14] Huang J F. Research on reverse modeling method of different surface features based on point cloud data [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2020, 17(2): 92-97.
- 黄加福. 基于点云数据的不同曲面特征逆向建模方法研究[J]. 华北科技学院学报, 2020, 17(2): 92-97.