

Design and Manufacturing of Heterogeneous Objects

Qigang Yuan¹, Jiquan Yang^{2*}, Guoan Zhang¹, Fengfeng Zhang¹

¹Xi'an Northern Electro-Optical Science & Technology Defense Co., Ltd., Xi'an

²Jiangsu Key Laboratory of Equipment and Manufacturing for 3D Printing, Nanjing

Email: [*jiquany@126.com](mailto:jiquany@126.com)

Received: Dec. 17th, 2013; revised: Jan. 27th, 2014; accepted: Feb. 10th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Heterogeneous Objects are functionally perfect structures, which are being studied in different disciplines. The currently popular modeling methods, visualization and Finite Element Analysis approaches for Heterogeneous Objects are described and the design methods of Heterogeneous Objects are also compared in detail. As a result, a novel technology of manufacturing Heterogeneous Objects is also presented.

Keywords

Heterogeneous Objects; Computer Aided Design; Finite Element Analysis

异质实体的设计与制造

袁祁刚¹, 杨继全^{2*}, 张国安¹, 张锋锋¹

¹西安北方光电科技防务有限公司, 西安

²江苏省三维打印装备与制造重点实验室, 南京

Email: [*jiquany@126.com](mailto:jiquany@126.com)

收稿日期: 2013年12月17日; 修回日期: 2014年1月27日; 录用日期: 2014年2月10日

*通讯作者。

摘要

异质实体是一种理想的功能性零件,目前是多个学科的研究热点之一。介绍了异质实体的常用建模方法,可视化方法和有限元仿真方法,并对异质实体的设计方法进行了分类比较,最后介绍了一种新的异质实体制造技术。

关键词

异质实体; 计算机辅助设计; 有限元分析

1. 引言

异质实体(Heterogeneous Objects, 或称非均质物体)的概念来源于自然界的物质结构,几乎所有的生物体,如牙齿、皮肤、骨骼、木材和竹子等,都是以异质实体的形态而存在的。其结构形式的特点就是具有最高强度的物质分布在需要最高强度的区域,这是自然界进化的结果,也是最优的物质结构形式,这样一种结构形式能降低结构破损的几率,使得生物体能更好地适应生存环境。

异质实体所涉范围极广,目前已多个学科共同的研究热点,但异质实体目前尚无明确分类。按照其功能和结构形态可分为人造型自然型异质实体、自然型异质实体以及变异型异质实体。

自然型异质实体是指大自然中存在的各类含有多种材料、且结构形式和材料分布呈静态或呈连续有规律动态分布的非均质物体;变异型异质实体则是指违背自然界规律或人为意愿而形成的蠕变型(如铜锈、疲劳破损等)或剧变型(如细胞病变、零件断裂等)非均质物体。其成型过程较前两者复杂且大多无规律可循。

人造型异质实体是指按照人为意愿而成型的非均质物体,进一步可分为装配型异质实体及合成型异质实体。装配型异质实体是指在人工或机械的辅助下、由多个不同材料零件组装而形成的非均质物体,如典型的微机电系统(MEMS)等,其材料组分可能会涉及多晶硅、陶瓷材料、高分子材料及金属处理等。这类机械装配型异质实体的特点是整个物体的各个组件是由单一材料制作的,然后再由人工或人为进行组装形成具有一定功能的非均质物体,彼此各组分材料不发生耦合或渗透;合成型异质实体是指在人工或机械的辅助下、通过化学反应、物理处理、基因工程或其他方法获得的具有多相材料的非均质物体。

典型的人工合成异质实体是梯度功能材料(Functionally Graded Materials, 简称 FGM),是指一类组成结构和性能在材料厚度或长度方向连续或准连续变化的非均质复合材料[1]。合成型异质实体的特点是结构形式及材料分布均较稳定。

本文综述了异质实体设计过程中涉及的建模、可视化、仿真等领域的研究现状,提出了基于数字化微滴喷射技术的异质实体设计与制造方法。

2. 人造型异质实体建模

目前对人造型异质实体建模的研究已成为多个学科的前沿性研究课题,针对不同的异质实体形态,研究者们提出了多种建模方法。根据异质实体的结构和材料形态变化,可把各类异质实体建模方法分为三类:静态型异质实体建模、动态型异质实体建模和混杂性异质实体建模。

2.1. 静态型异质实体建模

静态型异质实体建模适合于描述实体结构和材料分布均稳定的人造型异质实体。总体而言,可把人造型异质实体的建模分为两个基本过程:几何建模和材料建模。几何建模注重于异质实体的几何形状表

述，而材料建模则注重于异质实体的材料分布表述，零件的材料分布是基于零件的几何域而定义的。

对于装配型异质实体，由于其多种材料相互独立、界限分明，彼此无耦合关系，因此，采用传统的 CAD 建模和设计方法大都可以解决。对于合成型异质实体的建模研究最为集中，大致可以分为以下几种类型(见图 1)。

在众多的合成型异质实体建模方法中，较具有代表性的有：Dutta 等[2,3]采用描述几何信息的 r-set 集和描述材料信息的 rm-set 集表示合成型异质实体，该建模方法以 R-Rep 为基础，用几何空间描述几何信息，用其从空间描述材料信息；Jackson[4]研究了利用有限元网格描述几何信息、以单元节点到实体边界距离为变量描述材料特征的合成型异质实体建模方法，该方法把异质实体细分为不规则的四面体单元，数据运算和切片分层等数据处理较为复杂；Tan 等[5]-[8]研究了梯度源和特征树的建模方法，并较为系统地研究了合成型异质实体的 CAD 设计与可视化，开发了原型设计软件；Wu 等[9,10]采用基于距离场的体素模型描述合成型异质实体，并开发了针对异质实体的 CAD 原型软件；Fadel 等[11]-[13]研究了基于三维像素点的建模方法和基于空间曲线控制点的建模方法，并对异质实体 FEA 和成型方法进行了研究。

2.2. 动态型异质实体建模

静态型异质实体建模主要适用于形态结构和材料分布均呈静态或相对稳定的异质实体，但并没有考虑时间、材料相互作用、外界环境作用等因素，因此，对于那些具有一定生物活性或者在结构/材料分布上呈规律变化、甚至是复杂变化的异质实体则失去效能，如人工骨[14]、多金属熔融成型件[15]等的建模。这方面的研究较少，但也已引起一些研究者的关注。

2.3. 混杂型异质实体建模

在生物工程领域，如何来对癌细胞生长、扩散及对正常细胞的影响等问题进行研究？在机械工程领域，

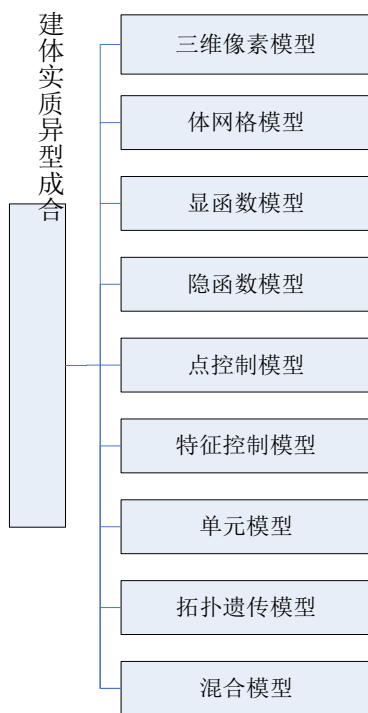


Figure 1. General modeling methods of synthetic heterogeneous objects
图 1. 合成型异质体常用建模方法

如何研究含有复合材料的机械零件的表面变性、晶格变异、老化及断裂等异常现象？这些研究对象的建模非常复杂，除了考虑时间因素外，还要考虑多种外在因素，以及不可知的其他因素。对这类异质实体的建模，往往采用理论模型、仿真模拟、预测判断及实验验证等多种研究方法，可称之为混杂型异质实体建模方法。如 Deutsch[16]在研究癌细胞的扩散和分布时就采用了理论建模、临床诊断、治疗等混杂型建模方法。

各种不同的异质实体分类及其建模方法比较见表 1。

3. 异质实体可视化

由于异质实体建模将经典几何建模的建模空间由三维欧几里德空间(或其子空间)拓展为三维欧氏空间与向量空间的直积空间，因而异质实体的可视化内容除了原有的三维几何信息外，还包括定义在三维空间上的场量信息。传统 CAD 建模软件多侧重于均质三维实体几何结构的可视化，因而相关的算法无法直接应用于异质实体的可视化中。此外，由于异质实体可视化涉及多维场量信息，因而可视化过程往往要消耗庞大的内存资源，同时伴有较高的 CPU 占用率。目前，异质实体可视化效率差、难以实现实时显示，已成为亟待解决的关键技术难题之一。

Tan 等提出了基于梯度源的可视化方法[17]和基于非流形几何与特征树的异质材料实体可视化方法，并采用了 XML 语言对异质实体模型进行数据转换研究，XML 模型经由 solid-works 软件进行验证[18]；吴晓军、刘伟军研究了基于体绘制的 Ray-casting 算法的可视化方法[19]。

4. 异质实体有限元分析

异质实体的设计不仅要解决能正确反映其结构和材料分布的可视化问题，同时还要解决其功能实现问题，也就是要确保能按照其设计要求正常工作，这就要求对异质实体进行有限元分析或其他数值分析以评估其物理特性或性能。

异质实体的有限元分析目前尚未有有效工具。目前的有限元分析几乎都集中于简单材料分布的异质实体或装配型异质实体，对于其他三类较为复杂的异质实体的分析则无能为力，因为大多有限元分析方法或软件都无公式或描述来支持复杂材料分布的异质实体。同时，当前的 CAD 建模工具，如 Pro-Engineer、Solidworks、UG 等与 CAE 模块之间的通讯和数据转换也不支持异质实体。因此，这就使得异质实体的有限元分析变得异常艰难。

Kou 和 Tan[20,21]对异质实体的有限元分析进行了研究，先是采用 CAD4D 原型系统表示异质实体，再将该实体模型转成 SAT (Standard ACIS Text)格式，再输入到 COMSOL 软件中进行有限元分析。Zhou 等研究了基于多色彩距离场的异质材料热传导过程[22]；Shin 研究了基于 ACIS 数据格式的有限元分析方法[23]；Wang 等研究了基于有限元分析的异质实体建模方法[24]。

Table 1. Classification and modeling methods of heterogeneous objects

表 1. 异质实体分类与建模方法

分类	结构形式	材料分布	材料多样性	建模方法
装配型异质实体	稳定	稳定	多种单一材料	静态型异质实体建模方法
合成型异质实体	稳定	稳定	多相材料 ^①	静态型异质实体建模方法
自然型异质实体	稳定或渐变	稳定或渐变	多相材料	静态型/动态型异质实体建模方法
变异型异质实体	突变或无规律渐变	突变或无规律渐变	多相材料	动态型/混杂型异质实体建模方法

①多相材料是指多种材料有机地协同分布于一个物体内部的材料组合形式，单一材料是多相材料的特殊形态。

5. 基于数字化微滴喷射技术的异质实体设计与制造

基于在多材料微滴喷射成型技术、快速成型技术、高分子材料等方面的研究基础，我们提出并研究了一种新的成型方法“基于数字化微滴喷射技术和快速成型技术的异质材料零件的设计与制造” [25,26]，其思路为：基于快速成型技术领域采用的彩色 STL(一种三维模型数据格式)模型，根据零件功能要求进行零件的几何拓扑形状(用单色 STL 面化模型数据表示)和材料组织结构(用色彩信息表示)的并行设计；对含有结构及材料信息的彩色 STL 模型进行切片分层，获得一系列彩色切片，并对每层的加工单元所对应的色彩信息和结构信息进行解析，使之与成型信息相对应；在成型过程中，采用微滴喷射技术和快速成型技术，将含有材料微粒的浓悬浮液、UV 光敏树脂或低熔点合金熔液，通过微细喷嘴实现数字化的分层微滴喷射，从而制得具有多种材料或多相材料的结构件。此种成型方法把高分子材料、低熔点合金材料、陶瓷微粒等不同有机和无机物质巧妙结合起来，为快速、精确制造异质材料零件提供了一种新型模式。其工作流程见图 2。

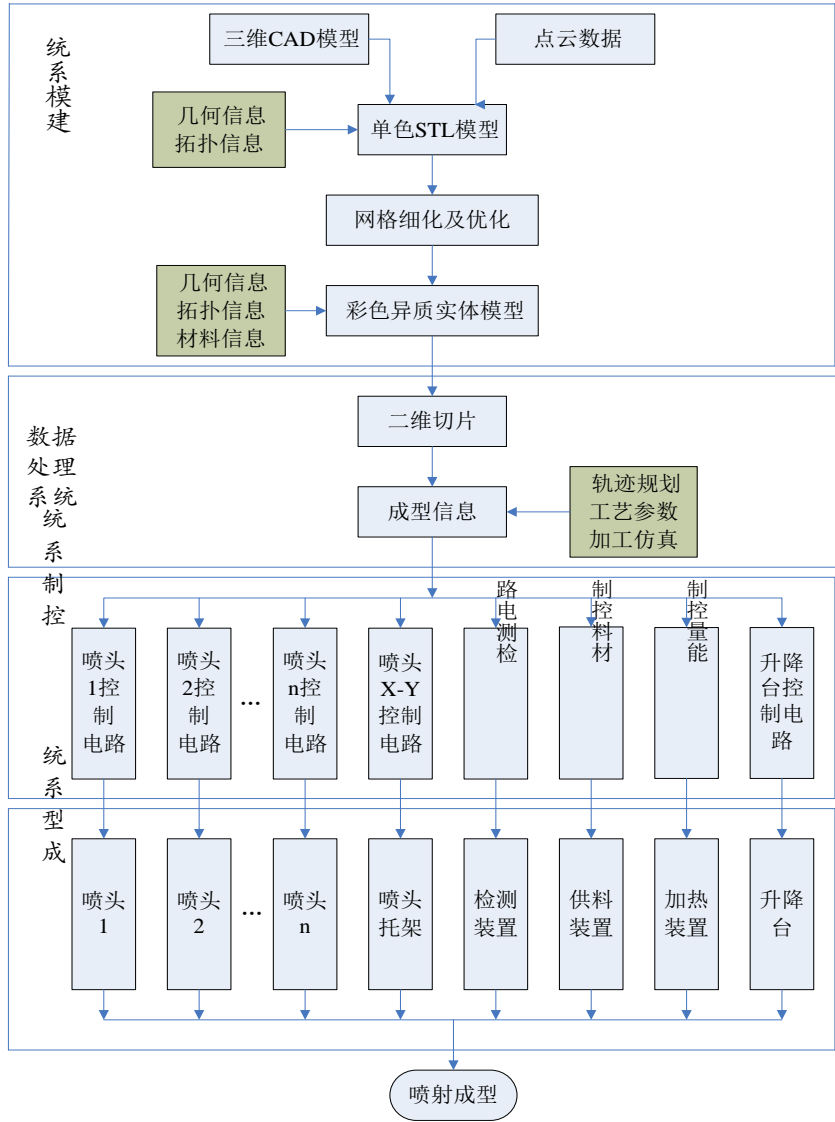


Figure 2. Heterogeneous objects framework based on digital micro-droplet dispensing technology
图 2. 基于数字化微滴喷射技术的异质实体

6. 结论

关于异质实体的设计方面的研究目前还存在以下问题：异质实体的建模理论，尤其对于多相材料建模、动态建模等的研究还不成熟；异质实体的模型可视化和有限元分析尚缺乏有效途径；异质实体的 CAD 研究与制造方法相互孤立，尚未形成 CAD/CAM 一体化；异质实体的成型机理尚不清晰，而這些问题的研究对于进一步理解和揭示异质实体在制造过程中产生的复杂物理现象和作用机理、提高异质实体成型质量具有重要的理论和实际指导意义。

项目基金

国家自然科学基金项目(61273243)，江苏省重大科技支撑与自主创新基金(BE2012201)，江苏省科技支撑计划(工业)重点项目(BE2013012)，江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2013058)。

参考文献 (References)

- [1] 新野正之, 平井敏雄, 渡边龙三 (1987) 倾斜机能材料——宇宙机用超耐热材料を目指して. 日本复合材料学会志, **6**, 257.
- [2] Kumar, V. and Dutta, D. (1998) An Approach to Modeling and Representation of Heterogeneous Objects, *ASME Journal of Mechanical Design*, **20**, 659-667.
- [3] Qian, X.P. and Dutta, D. (2004) Feature-Based Design for Heterogeneous Objects. *Computer Aided Design*, **36**, 1263-1278.
- [4] Jackson, T.R. (2000) Analysis of Functionally Graded Material Object Representation Methods. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [5] Kou, X.Y. and Tan, S.T. (2005) A Hierarchical Representation for Heterogeneous Object Modeling. *Computer-Aided Design*, **37**, 307.
- [6] Kou, X.Y., Tan, S.T. and Sze, W.S. (2006) Modeling Complex Heterogeneous Objects with Non-Manifold Heterogeneous Cells. *Computer-Aided Design*, **38**, 457-474.
- [7] Siu, Y.K. and Tan, S.T. (2002) Modeling the Material Grading and Structures of Heterogeneous Objects for Layer Manufacturing. *Computer-Aided Design*, **34**, 705-716.
- [8] Kou, X.Y. and Tan, S.T. (2009) Robust and Efficient Algorithms for Rapid Prototyping of Heterogeneous Objects. *Rapid Prototyping Journal*, **15**, 5-18.
- [9] 吴晓军, 刘伟军, 王天然, 温佩芝 (2005) 距离场定义下异质材料 CAD 信息建模方法. *计算机辅助设计与图形学学报*, **2**, 313-319.
- [10] Wu, X.J., Liu, W.J. and Wang, M.Y. (2008) A CAD Modeling System for Heterogeneous Object. *Advances in Engineering Software*, **39**, 444-453.
- [11] Hu, Y., Blouin, V.Y. and Fadel, G.M. (2005) Design for Manufacturing of 3D Heterogeneous Objects with Processing Time Considerations. Proceedings of ASME 2005 Design Engineering Technical Conferences, *Long Beach*, 24-28 September 2005.
- [12] Huang, J., Fadel, G.M., Blouin, V.Y. and Grujicic, M (2002) Bi-Objective Optimization Design of Functionally Gradient Materials. *Materials & Design*, **23**, 657-666.
- [13] Hu, Y., Blouin, V.Y. and Fadel, G.M. (2008) Design for Manufacturing of 3D Heterogeneous Objects with Processing Time Consideration. *Journal of Mechanical Design*, **130**, Article ID: 031701-8.
- [14] Dean, D., Wallace, J., Kim, K., Mikos, A.G. and Fisher, J.P. (2010) Stereolithographic Rendering of Low Molecular Weight Polymer Scaffolds for Bone Tissue Engineering. Innovative Developments in Design and Manufacturing Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping. Proceedings of VR@P4, Leiria.
- [15] Cooper, K.P. and Lambrakos, S.G. (2011) Thermal Modeling of Direct Digital Melt-Deposition Processes. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **20**, 48-56.
- [16] Deutsch, A. (2005) Cellular Automaton Modeling of Biological Pattern Formation: Characterization, Applications, and Analysis. Boston (Basel): Birkhäuser.
- [17] Siu Y.K. and Tan, S.T. (2002) Representation and CAD Modeling of Heterogeneous Objects. *Rapid Prototyping*, **8**, 70-75.

- [18] Kou, X.Y. and Tan, S.T. (2009) An XML Implementation for Data Exchange of Heterogeneous Object Models. In: Xu, X. and Nee, A.Y.C., Eds., *Advanced Design and Manufacturing Based on STEP*, Springer-Verlag London Limited, London, 419-438.
- [19] 吴晓军, 刘伟军 (2010) 异质材料 CAD 模型可视化算法. *中国机械工程*, **17**, 2095-2100.
- [20] Kou X.Y. and Tan, S.T. (2007) A systematic approach for Integrated Computer-Aided Design and Finite Element Analysis of Functionally-Graded-Material Objects. *Materials and Design*, **28**, 2549-2565.
- [21] Kou, X.Y. and Tan S.T. (2008) Heterogeneous Object Design: An Integrated CAX Perspective. In: A. Pasko, V. Adzhiev and P. Comminos, Eds., *HOMA, LNCS 4889*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 42-59.
- [22] Zhou, H.M., Liu, Z.G. and Lu, B.H. (2010) Heat Conduction Analysis of Heterogeneous Objects Based on Multi-Color Distance Field. *Materials & Design*, **31**, 3331-3338.
- [23] Shin, K.-H. (2006) FEA-Based Design of Heterogeneous Objects. *Proceedings of IDETC/CIE 2006 ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Philadelphia, 10-13 September 2006, 1-9.
- [24] Wang, S., Chen, N.F., Chen, C.-S. and Zhu, X.X. (2009) Finite Element-Based Approach to Modeling Heterogeneous Objects. *Finite Elements in Analysis & Design*, **45**, 592-596.
- [25] Zhu, Y.F., Yang, J.Q., Peng, C. and Wang, C.M. (2010) An Integrated Design and Fabrication Approach for Heterogeneous Objects. *2010 International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control*, Zibo, 26-28 November 2010, 20-23.
- [26] 朱玉芳, 杨继全, 岳东 (2009) 多材料模型的数字化喷射成型方法. *机械科学与技术*, **2**, 200-204.