



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

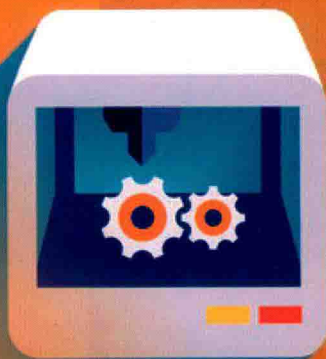
3D打印前沿技术丛书

丛书顾问◎卢秉恒 丛书主编◎史玉升

异质材料3D打印技术

杨继全 李娜 施建平 唐文来 张钢◎著

YIZHI CAILIAO 3D DAYIN JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



湖北省学术著作出版专项资金资助项目
3D打印前沿技术丛书
丛书顾问◎卢秉恒 丛书主编◎史玉升

异质材料3D打印技术

杨继全 李 娜 施建平 唐文来 张 钢◎著

YIZHI CAILIAO 3D DAYIN JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书以南京师范大学江苏省三维打印装备与制造重点实验室科研团队的有关研究成果为基础,主要对使用3D打印技术制造异质零件的相关内容进行系统性论述。本书的指导思想是在详细介绍异质零件CAD建模方法的基础上,深入分析异质零件的成形材料设计及制备、异质零件的成形技术及具体应用,期望给读者展现有关异质零件3D打印技术方面较为完整的系统性知识。

本书具体内容:第1章绪论,概述了异质实体(或称异质零件)的概念及分类;第2章异质零件3D打印建模基础;第3章异质零件的静态建模方法;第4章异质零件的动态建模方法;第5章异质零件模型设计可视化;第6章异质零件3D打印的成形材料;第7章异质零件的3D打印成形技术;第8章基于3D打印的异质零件的应用。

本书在内容组织方面力求深入浅出,兼顾不同知识背景读者的要求,既保证内容新颖,反映国内外最新研究成果,又深入探讨理论知识和实际应用。本书可供工业制造、生物医学、化学工程、电子工程等不同领域的工程技术人员阅读,也可供致力于3D打印领域研究的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

异质材料3D打印技术/杨继全等著. —武汉:华中科技大学出版社,2019.3
(3D打印前沿技术丛书)
ISBN 978-7-5680-5029-6

I. ①异… II. ①杨… III. ①立体印刷-印刷术 IV. ①TS853

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第047238号

异质材料3D打印技术

Yizhi Cailiao 3D Dayin Jishu

杨继全 李 娜 施建平 唐文来 张 钢 著

策划编辑:张少奇

责任编辑:程 青

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:12

字 数:237千字

版 次:2019年3月第1版第1次印刷

定 价:98.00元



湖北新华

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



3D 打印前沿技术丛书

顾问委员会

- 主任委员 卢秉恒(西安交通大学)
副主任委员 王华明(北京航空航天大学)
 聂祚仁(北京工业大学)

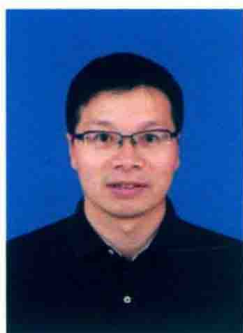
编审委员会

- 主任委员 史玉升(华中科技大学)
委员 (按姓氏笔画排序)
朱 胜(中国人民解放军陆军装甲兵学院)
刘利刚(中国科学技术大学)
闫春泽(华中科技大学)
李涤尘(西安交通大学)
杨永强(华南理工大学)
杨继全(南京师范大学)
陈继民(北京工业大学)
林 峰(清华大学)
宗学文(西安科技大学)
单忠德(机械科学研究总院集团有限公司)
赵吉宾(中国科学院沈阳自动化研究所)
贺 永(浙江大学)
顾冬冬(南京航空航天大学)
黄卫东(西北工业大学)
韩品连(南方科技大学)
魏青松(华中科技大学)



About Authors

作者简介



杨继全 男,1973年生,工学博士,南京师范大学南瑞电气与自动化学院教授,江苏省三维打印装备与制造重点实验室主任,南京三维打印学会理事长,江苏省三维打印产业技术创新战略联盟副理事长兼技术专家委员会副主任。近五年先后主持了国家自然科学基金项目、国家“增材制造与激光制造”重点专项子课题、江苏省省级科技创新与成果转化(重大科技支撑与自主创新)项目、江苏省科技成果转化专项资金重大项目、江苏省科技支撑重大专项等多项课题。获得2008、2014年度江苏省科技进步奖二等奖各1项,2013年度南京市科技进步奖三等奖1项,出版专著10余部。主要研究方向为3D打印技术与生物制造等,围绕数字微滴喷射3D打印成形工艺,实现了研究成果在教育、工业、生物等领域的应用与转化。



李娜 女,1977年生,工学博士,南京师范大学南瑞电气与自动化学院副教授,南京三维打印学会、南京惯性技术学会会员。2008年毕业于武汉大学动力与机械学院,研究方向为3D打印技术,导电材料微滴喷射成形,异质结构、多材料打印成形技术。主持江苏省自然科学基金项目1项,参与完成了国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目等的研究。



施建平 男,1987年生,工学博士,南京师范大学南瑞电气与自动化学院讲师,南京三维打印学会会员。2018年毕业于东南大学机械工程学院,研究方向为3D打印技术,多孔/异质结构建模技术,多材料打印成形技术,机器人3D打印技术。主持江苏省重点实验室开放基金项目2项,参与完成了国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目等的研究。



总序一

“中国制造 2025”提出通过三个十年的“三步走”战略,使中国制造综合实力进入世界强国前列。近三十年来,3D 打印(增材制造)技术是欧美日等高端工业产品开发、试制、定型的重要支撑技术,也是中国制造业创新、重点行业转型升级的重大共性需求技术。新的增材原理、新材料的研发、设备创新、标准建设、工程应用,必然引起各国“产学研投”界的高度关注。

3D 打印是一项集机械、计算机、数控、材料等多学科于一体的,新的数字化先进制造技术,应用该技术可以成形任意复杂结构。其制造材料涵盖了金属、非金属、陶瓷、复合材料和超材料等,并正在从 3D 打印向 4D、5D 打印方向发展,尺度上已实现 8 m 构件制造并向微纳制造发展,制造地点也由地表制造向星际、太空制造发展。这些进展促进了现代设计理念的变革,而智能技术的融入又会促成新的发展。3D 打印应用领域非常广泛,在航空、航天、航海、潜海、交通装备、生物医药、康复产业、文化创意、创新教育等领域都有非常诱人的前景。中国高度重视 3D 打印技术及其产业的发展,通过国家基金项目、攻关项目、研发计划项目支持 3D 打印技术的研发推广,经过二十多年培养了一批老中青结合、具有国际化视野的科研人才,国际合作广泛深入,国际交流硕果累累。作为“中国制造 2025”的发展重点,3D 打印在近几年取得了蓬勃发展,围绕重大需求形成了不同行业的示范应用。通过政策引导,在社会各界共同努力下,3D 打印关键技术不断突破,装备性能显著提升,应用领域日益拓展,技术生态和产业体系初步形成;涌现出一批具有一定竞争力的骨干企业,形成了若干产业集聚区,整个产业呈现快速发展局面。

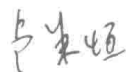
华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准 3D 打印科学技术前沿,组织策划了本套“3D 打印前沿技术丛书”,并且,其中多部将与爱思唯尔(Elsevier)出版社一起,向全球联合出版发行英文版。本套丛书内容聚焦前沿、关注应用、涉猎广泛,不同领域专家、学者从不同视野展示学术观点,实现了多学科交叉融合。本套丛书采用开放选题模式,聚焦 3D 打印技术前沿及其应用的多个领域,如航空航天、

工艺装备、生物医疗、创新设计等领域。本套丛书不仅可以成为我国有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,也是我国科技人员展示研究成果的国际平台。

近年来,中国高校设立了 3D 打印专业,高校师生、设备制造与应用的相关工程技术人员、科研工作者对 3D 打印的热情与日俱增。由于 3D 打印技术仅有三十多年的发展历程,该技术还有待于进一步提高。希望这套丛书能成为有关领域专家、学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者、编者与读者之间的联系,促进作者、读者在应用中凝练关键技术和科学问题,在解决问题的过程中,共同推动 3D 打印技术的发展。

我乐于为本套丛书作序,感谢为本套丛书做出贡献的作者和读者,感谢他们对本套丛书长期的支持与关注。

西安交通大学教授
中国工程院院士



2018 年 11 月



总序二

3D 打印是一种采用数字驱动方式将材料逐层堆积成形的先进制造技术。它将传统的多维制造降为二维制造,突破了传统制造方法的约束和限制,能将不同材料自由制造成空心结构、多孔结构、网格结构及梯度功能结构等,从根本上改变了设计思路,即将面向工艺制造的传统设计变为面向性能最优的设计。3D 打印突破了传统制造技术对零部件材料、形状、尺度、功能等的制约,几乎可制造任意复杂的结构,可覆盖全彩色、异质、梯度功能材料,可跨越宏观、介观、微观、原子等多尺度,可整体成形甚至取消装配。

3D 打印正在各行业中发挥作用,极大地拓展了产品的创意与创新空间,优化了产品的性能,大幅降低了产品的研发成本,缩短了研发周期,极大地增强了工艺实现能力。因此,3D 打印未来将对各行业产生深远的影响。为此,“中国制造 2025”、德国“工业 4.0”、美国“增材制造路线图”,以及“欧洲增材制造战略”等都视 3D 打印为未来制造业发展战略的核心。

基于上述背景,华中科技大学出版社希望由我组织全国相关单位撰写“3D 打印前沿技术丛书”。由于 3D 打印是一种集机械、计算机、数控和材料等于一体的新型先进制造技术,涉及学科众多,因此,为了确保丛书的质量和前沿性,特聘请卢秉恒、王华明、聂祚仁等院士作为顾问,聘请 3D 打印领域的著名专家作为编审委员会委员。

各单位相关专家经过近三年的辛勤努力,即将完成 20 余部 3D 打印相关学术著作的撰写工作,其中已有 2 部获得国家科学技术学术著作出版基金资助,多部将与爱思唯尔(Elsevier)联合出版英文版。

本丛书内容覆盖了 3D 打印的设计、软件、材料、工艺、装备及应用等全流程,集中反映了 3D 打印领域的最新研究和应用成果,可作为学校、科研院所、企业等



单位有关人员的参考书,也可作为研究生、本科生、高职高专生等的参考教材。

由于本丛书的撰写单位多、涉及学科广,是一个新尝试,因此疏漏和缺陷在所难免,殷切期望同行专家和读者批评与指正!

华中科技大学教授

2018 年 11 月

前 言

3D 打印(也称增材制造)是集材料、结构及功能为一体的并行设计与制造技术,在工业、医疗、教育等领域已得到广泛应用。3D 打印虽然具有对象个性化、结构复杂化的特点,但常用的 3D 打印工艺一般只能制作单一均质材料的成形零件,而自然界中存在的物体或非人工制造的生态型物体,如牙齿、竹子、贝壳等均是含有多种材料的功能型异质结构体,也称为异质实体。对于此类异质实体(本书将人工制造的异质实体称为异质零件)的制造,传统制造方法往往无能为力。由于 3D 打印技术采用分层制造及叠加成形原理,理论上可实现多种材料、结构和功能的任意成形,因此,异质零件的设计与制造问题近年已成为 3D 打印领域研究的热点之一。

本书围绕异质零件的 3D 打印技术进行系统化研究,重点阐述异质零件的概念及分类、异质零件的静态建模方法及动态建模方法、异质零件建模可视化方法、异质零件的材料设计与制备、异质零件的 3D 打印成形技术、异质零件应用等内容。

本书所阐述的内容以南京师范大学江苏省三维打印装备与制造重点实验室科研团队近年开展的多项科研项目所形成的科研成果为基础,结合本领域国内外众多学者的研究成果,既保证内容新颖,反映最新学术研究方向,又进行了深入的理论探讨与技术介绍,同时也较为详细地介绍了本领域针对某个研究,不同的学者所提出的不同研究思路、方法及成果,供读者参考和学习。因此,本书既可为从事该领域研究的科研人员提供借鉴与参考,同时也可供相关领域的工程技术人员阅读。

本书共 8 章:第 1 章绪论和第 2 章异质零件 3D 打印建模基础由杨继全编写,第 3 章异质零件的静态建模方法和第 4 章异质零件的动态建模方法由李娜和杨继全编写,第 5 章异质零件模型设计可视化由李娜编写,第 6 章异质零件 3D 打印的成形材料由唐文来和施建平编写,第 7 章异质零件的 3D 打印成形技术由李娜和施建平编写,第 8 章基于 3D 打印的异质零件的应用由施建平和张钢编写。

本书的出版得到国家重点研发计划(2017YFB1103200)、江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)(BE2018010、BE2016010)、国家自然科学基金项目(51407095、51605229、50607094、61601228、61603194)、江苏省科技成果转化专项资金重大项目(BA201606)、江苏省高校自然科学基金项目(16KJB12002)、江苏省重点国别产业技术研发合作项目(BZ2018027)等项目的支持。

本书集中反映了本团队的有关研究成果,这些成果是本研究团队经过长期的持续研究取得的,本团队的主要研究成员除了本书的作者以外,还包括:程军、杨建飞、程继红、冯春梅、朱莉娅、刘益剑、邱鑫、谢非、郭爱琴等老师,吕超凡、韩宁达、曹伟、刘训、李灿、徐泽玮、何昱煜、李思祥、戴鑫、王伟业、袁哲、徐帅、马辉、董良滔、朱兵、张馨宇、杨帅、汤浩、赵文娟、朱钊伟、游勇、樊温新、迟翔、樊宁、王日茗、程明、余成等研究生。

在本书的撰写过程中,南京工业大学毛宏理教授参与了第5章相关内容的撰写、审核和修改,顾忠伟教授对本书提出了许多非常有见地的指导意见,在此一并表示感谢!

本书的编写参考了大量的研究论文、研究报道等相关资料,除每章注明的参考文献外,其余的参考资料主要有公开发表于各类报纸、期刊、图书、互联网等上的资料。本书中所采用的图片、模型等素材均为所属公司、网站或个人所有,本书引用仅为说明之用,绝无侵权之意,特此声明,在此向参考资料的各位作者表示谢意!

最后衷心感谢华中科技大学出版社在本书出版过程中给予的大力支持!

由于我们是首次以异质零件的3D打印技术作为主要内容进行系统性介绍,有些内容是我们的初步研究成果,有些研究工作还在继续,我们对该技术的认知还在不断深化,对一些问题的理解还不够深入,加之作者的学术水平和知识面有限,书中可能存在文献的引用疏漏、信息不准确之处,殷切期望同行专家和读者的批评指正和宝贵意见,在此预致谢意!

杨继全,李娜,施建平,唐文来,张钢

2018年10月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 异质实体分类	(1)
1.2 异质零件特点及应用	(4)
1.3 异质零件成形技术及设备	(5)
1.4 本书结构安排	(10)
本章参考文献	(11)
第 2 章 异质零件 3D 打印建模基础	(15)
2.1 多材料 3D 打印成形原理	(15)
2.2 异质零件制造的模型及数据格式	(17)
2.3 本章小结	(33)
本章参考文献	(33)
第 3 章 异质零件的静态建模方法	(35)
3.1 静态模型	(35)
3.2 网络节点的获取	(37)
3.3 基于体素法的建模方法	(39)
3.4 基于表面轮廓的建模方法	(50)
3.5 本章小结	(53)
本章参考文献	(53)
第 4 章 异质零件的动态建模方法	(55)
4.1 材料特征描述	(55)
4.2 体素表示法	(57)
4.3 实体与材料的映射	(58)
4.4 特征节点的提取	(61)
4.5 材料动态变化设计	(64)
4.6 基于体素的混杂微四面体	(67)
4.7 动态模型示例	(68)
4.8 本章小结	(70)
本章参考文献	(70)

第 5 章 异质零件模型设计可视化	(72)
5.1 实体离散	(72)
5.2 彩色文件格式	(73)
5.3 材料设计可视化	(80)
5.4 彩色 STL 模型材料映射可视化	(83)
5.5 彩色微四面体材料映射可视化	(85)
5.6 可视化实例	(88)
5.7 本章小结	(90)
本章参考文献	(90)
第 6 章 异质零件 3D 打印的成形材料	(94)
6.1 3D 打印常用成形材料概述	(94)
6.2 3D 打印异质零件材料的设计	(95)
6.3 3D 打印异质结构材料	(98)
6.4 4D 打印材料	(99)
6.5 电工电子材料	(105)
6.6 生物 3D 打印材料	(116)
6.7 本章小结	(120)
本章参考文献	(121)
第 7 章 异质零件的 3D 打印成形技术	(127)
7.1 异质零件成形方法	(127)
7.2 异质零件 CAD 模型数据处理方法	(136)
7.3 基于数字微滴喷射工艺的 3D 打印异质零件成形装置	(147)
7.4 异质零件成形实例	(151)
7.5 本章小结	(155)
本章参考文献	(156)
第 8 章 基于 3D 打印的异质零件的应用	(158)
8.1 在生物医学工程中的应用	(159)
8.2 在国防工程领域中的应用	(163)
8.3 在工业制造领域中的应用	(167)
8.4 在功能性零件制造中的应用	(168)
8.5 本章小结	(171)
本章参考文献	(172)

第 1 章 绪 论

自然界中的物体大多是由多种材料构成的非均质物体,即异质实体(heterogeneous objects, HEO),其材料组分在空间分布上相异。例如,骨骼、牙齿和竹子等就属于典型的异质实体,其特点是具有最高强度的物质分布在需要最高强度的区域,这是最优的物质结构形式,这种结构形式能降低结构破损的概率,使得生物体能更好地适应生存环境。

1.1 异质实体分类

目前,异质实体已成为多个学科共同的研究热点,按照功能和结构形式可将其分为人造型异质实体、自然型异质实体和变异型异质实体三类,如图 1.1 所示。



图 1.1 异质实体分类

1) 自然型异质实体

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,如竹子。图 1.2 所示为竹子微结构,其从内层至外层,材料结构渐变,强度依次增强,致密度依次增加,这种材料分布渐变式结构有利于竹子保持重量轻的同时具有足够的弹性和强度。

骨骼是另一种典型的自然型异质实体,其组织可看作一个矿化组织的骨骼系统,其结构如图 1.3 所示。骨骼由骨间质和骨细胞构成,其中,骨间质由胶原蛋白纤维、磷酸钙、碳酸钙、镁离子、氟离子等组成,且磷酸钙和碳酸钙等骨盐又与血钙、磷含量密切相关,相互补充,不断更新;骨细胞可促进骨质溶解(称为骨细胞性溶骨),引起骨质疏松,发生骨折。由此可以看出,骨骼是一种多种材料非均匀分布,且组分不断变化的自然型异质实体。

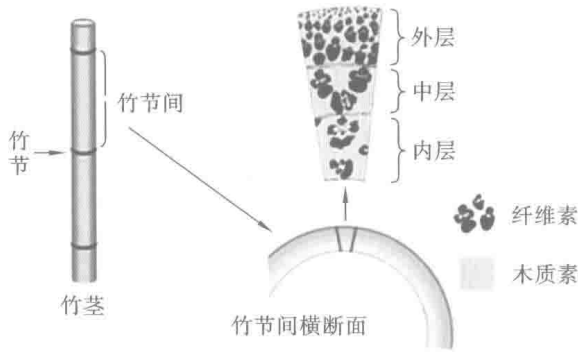


图 1.2 竹子微结构

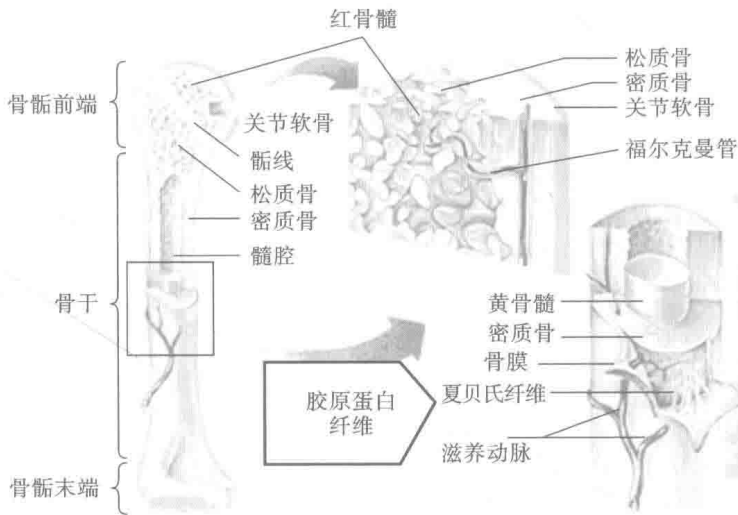


图 1.3 骨骼组织结构

2) 人造型异质实体

人造型异质实体是指按照特定功能成形的非均质物体,按照其成形过程可分为装配型异质实体和合成型异质实体。其中,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(micro electro-mechanical system, MEMS)包括微机械结构、微制动器、微传感器、微光学器件等,其材料组分包含多晶硅、陶瓷材料、高分子材料及金属等。这类机械装配型异质实体的特点是整个物体的各个组件由单一材料制作,然后再由人工或机械进行组装,形成具有一定功能的非均质物体,各组分的材料之间不发生耦合或渗透。

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。典型的人工合成型异质实体是梯度功能材料(functionally graded materials, FGM)。它是由日本新野正之、平井敏雄与渡边龙三于 1986 年首先提出的,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。合成型异质实体的特点是结构形式及材料分布均较稳定。

人造型异质实体按照异质实体的功能,由人工干预而实现材料优化分布。有的文献把这种按零件的最佳使用功能要求来设计制造,由呈梯度变化的组织成分和一定规律分布的细结构材料与均质材料所组合构成的新型材料零件称为理想材料零件。

3) 变异型异质实体

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。其成形过程较前两种异质实体复杂且大多无规律可循。

异质实体根据结构和材料形态变化,可分为静态型异质实体和动态型异质实体。静态型异质实体主要是指实体的材料分布呈梯度变化的异质零件,如图 1.4 所示。动态型异质实体是指零件结构分布和内部材料分布复杂,既有均质材料又有梯度功能材料,而且呈非规律变化,如图 1.5 所示。其中,材料 1 和材料 2、材料 3 和材料 4 均为梯度分布,但材料 3、材料 4 构成的梯度功能材料区域,以及材料 5 构成的均质材料区域与材料 1、材料 2 构成的梯度功能材料区域却有明显的材料界面。

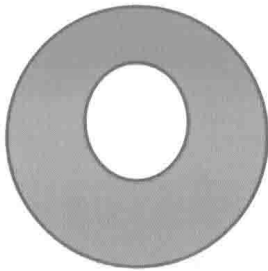


图 1.4 静态型异质实体

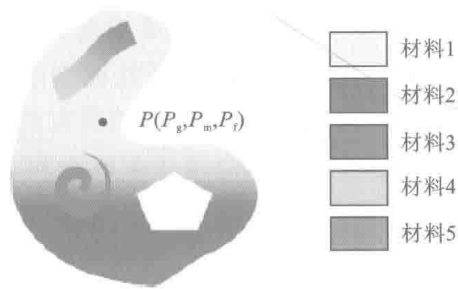


图 1.5 动态型异质实体

对上述三种异质实体进行简要对比,其结构形式和材料分布形式如表 1.1 所示。

表 1.1 三种异质实体简要比较

分 类		结 构 形 式	材 料 分 布	材 料 分 布 形 式
人造型 异质实体	合成型异质实体	稳定	稳定	多种单一材料
	装配型异质实体	稳定	稳定	多相材料 ^①
自然型异质实体		渐变	渐变	多相材料
变异型异质实体		渐变	渐变	多相材料

① 多相材料是指多种材料有机协同分布于一个物体内部,单一材料是多相材料的特殊形态。

本书讨论异质实体的设计和制造,为了避免混乱,此处对几个名词进行区分和定义:

(1) 异质实体,指由多种材料构成的非均质物理性结构;

(2) 异质结构,指多种材料非均匀分布且组分可不断变化的组织形式;

(3) 异质对象,指被研究的异质物体,可指导质型设计结构,也可指导质型物理性结构;

(4) 异质零件,指能满足特定需求或具有明确功能的多材料异质零件;

(5) 多材料异质零件,本书特指基于 3D 打印技术制作的多材料异质零件。所谓多材料异质零件是指按照零件的最佳使用功能要求来设计制造的零件,由多种材料构成的理想型、功能性零件。本书中异质零件和多材料异质零件含义相同。

1.2 异质零件特点及应用

异质零件属于人造型异质实体,是指多种材料在零件内部连续或非连续分布的功能性零件,主要包括多材料零件、梯度功能材料零件和多相材料零件,也可以把前两者视为典型的多相材料零件。

目前,市场对产品的性能要求愈来愈高,由单相或均质材料构成的零件常常难以满足产品对零件的功能或性能需求,这使得对异质零件的研究成为机械、电子、光学、生物、材料等多个学科的研究热点之一。

异质成形件可广泛应用于耐磨涂料、固体氧化物燃料电池、牙齿/骨骼移植、模具制造、温差电敏器件、调速轮、热障等领域。当前对异质零件的发展重点在异质成形件的建模、加工工艺和材料制备及性能调控等方面。

异质零件有很广阔的应用前景,通过高分子材料、低熔点合金材料、陶瓷等不同有机和无机物质的巧妙结合而制作出的异质零件,将可以广泛应用于航空航天工业、机械工程、生物医学工程等领域。

1) 分子材料异质零件

分子材料异质零件可广泛应用于耐磨功能部件、人工器官、耐腐蚀材料的化工设备结构部件等,目前已在生物医药材料(如人体植入物)、功能压敏材料(如高分子梯度功能材料薄膜、无载体压敏胶膜)、阻尼材料(如沿材料厚度方向呈梯度变化、具有良好阻尼性能的阻尼涂层)等方面得到应用。

2) 陶瓷-低熔点合金梯度功能材料零件

采用含不同比例可热解材料(或其他方法可去除的其他辅助材料)的陶瓷粉末熔液(或溶液)制成预制件,加热去除可热解材料(或其他方法可去除的其他辅助材料)即可得到具有不同气孔密度的陶瓷材料中间件,对中间件进行烧结,然后