

3D 打印技术的发展及其软件实现

史玉升*, 张李超*, 白宇, 赵祖焯

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074

* 通信作者. E-mail: shiyusheng@hust.edu.cn, dr.teac@gmail.com

收稿日期: 2014-08-20; 接受日期: 2014-10-23; 网络出版日期: 2015-01-21

国家高技术研究发展计划 (“863” 计划)(批准号: SS2015AA042001) 资助项目

摘要 随着 3D 打印技术的不断发展, 其已经超越传统单材均质加工技术的限制, 成为可实现多材料、功能梯度材料、多色及真彩色表面纹理贴图制件的直接制造; 可跨越多个尺度(从微观结构到零件级的宏观结构)直接制造; 并传统加工工艺结合, 可实现多种兼顾精度和形状复杂度的新型加工方法. 本文叙述了国内外上述技术的研究发展概况, 并论述了传统建模技术、3D 打印数据交换格式、数据处理软件架构等方面应对 3D 打印技术最新发展和挑战的对策.

关键词 3D 打印 多材料 多色 多尺度工艺结构 AMF

1 引言

3D 打印 (three-dimensional printing) 技术是一种“从无到有”的增材制造方法^[1]. 其思想起源于 19 世纪末美国一项分层构造地貌地形图的专利, 并在 20 世纪 80 年代得以发展与推广.

3D 打印技术在美国发展迅速, 其发展状况基本可代表全球 3D 打印技术的发展. 1988 年美国的 3D Systems 公司生产出了第一台 3D 打印装备 SLA250, 开创了 3D 打印技术发展的新纪元. 1991 年, 美国 Stratasys 公司的熔融沉积制造 (fused deposition modeling, FDM) 装备、以色列 Cubital 公司的实体平面固化 (solid ground curing, SGC) 装备和美国 Helisys 公司的叠层实体制造 (laminated object manufacturing, LOM) 装备都实现了商业化. 1992 年, 美国 DTM 公司 (现属于 3D Systems 公司) 的激光选区烧结 (selective laser sintering, SLS) 装备研发成功, 开启了 3D 打印技术发展热潮. 1996 年, 3D Systems 使用喷墨打印技术, 制造出其第一台 3D 打印装备 Actua2100. 1996 年, 美国 Zcorp 公司也发布了 Z402 型 3D 打印装备. 国内自 20 世纪 90 年代初开始 3D 打印技术研发, 以华中科技大学研制的 LOM 装备和 SLS 装备、西安交通大学的光固化成型 (stereo lithography, SL) 装备、北京航空航天大学激光快速成型装备以及清华大学的 FDM 装备最具代表性^[2].

3D 打印技术是一项革命性技术, 3D 打印无需机械加工或者模具, 甚至无需在工厂进行操作. 英国《经济学人》杂志则认为它将“与其他数字化生产模式一起推动实现第三次工业革命”¹⁾, 认为该技术将改变未来生产与生活模式, 实现社会化制造, 每个人都可以成为一个工厂. 此外它将改变制造商品的方式, 进而改变世界的经济格局, 最终改变人类的生活方式^[3].

1) The Economist. A third industrial revolution (special report: manufacturing and innovation). <http://www.economist.com/node/21552901>, 2012-04-21.

引用格式: 史玉升, 张李超, 白宇, 等. 3D 打印技术的发展及其软件实现. 中国科学: 信息科学, 2015, 45: 197-203, doi: 10.1360/N112014-00229

2 3D 打印技术的发展概述

与传统加工方式相比, 3D 打印技术将三维实体加工变为由点到线、由线到面、由面到体的离散堆积成形过程, 极大地降低了制造复杂度. 3D 打印技术在发展之初, 首先突破了传统制造技术在形状复杂性方面的技术瓶颈, 能快速制造出传统工艺难以加工、甚至无法加工的复杂形状及结构特征. 随着 3D 打印技术的不断发展, 现代 3D 打印技术已经超越传统单材均质加工技术的限制, 突破下述 3 个复杂性. 材料复杂性: 可实现多材料、功能梯度材料^[4]、多色及真彩色表面纹理贴图零件的直接制造; 层次复杂性: 可跨越多个尺度^[5](从微观结构到零件级的宏观结构) 直接制造; 功能复杂性: 增材制造可以在一次加工过程中完成功能结构的制造, 从而简化甚至省略装配过程.

2.1 多材料、多色 3D 打印技术概述

多色的 3D 打印技术能直接获得产品设计的彩色外观, 而不需要后处理流程, 在消费领域、原型手板及教育行业较以往的单色 3D 打印制件有着巨大优势. 多材质的 3D 打印技术能将不同性能的材料构建于同一零件上, 缩短加工流程, 减少装配, 提高性能. 3D 打印技术经近些年的发展, 已经出现多种实现多材料、多色打印的技术方法, 并开发出商品化装备.

Stratasys 公司²⁾ 的最新款 3D 打印装备 Objet500 Connex3 (收购自 Object Geomatries 公司) 支持同一部件多材质、多色打印, 该系列 3D 打印装备采用 Polyjet(喷射固化成型) 技术^[6], 由 Object Geomatries 公司 2007 年发布, 使用阵列式喷头将光固化树脂喷射到基底上然后用紫外光将其固化成形, 其层厚可达 16 μm , 通过不同颜色树脂的混合, 可以打印上百种色调, 可用于牙科、医疗和消费产品行业的 3D 打印. Polyjet 技术使用特别设计的凝胶类支撑材料与所选的模型材料一起喷射, 以支撑悬垂和复杂的几何图形. 可用手或用水轻松将其除去. PolyJet 3D 打印技术最显著的特点是可同时打印多种材料, 包括上百种鲜亮颜色的刚性不透明材料、透明和着色的半透明色调材料、橡胶类柔韧材料和专业光聚合物, 特别适用于牙科、医疗和消费产品行业的 3D 打印. 与该技术原理类似的还有美国 3D Systems 公司的多喷头打印 (multijet printing, MJP) 技术, 其代表产品为 ProJet 5500X 3D 打印机, 可实现两种材料的按比例渐变混合打印.

3D Systems 公司³⁾ 的 ZPrinter 系列 3D 打印装备 (收购自 Z Corporation 公司) 采用彩色喷墨打印 (colorjet printing, CJP) 技术, 该技术通过在粉末床上喷射彩色粘接剂的方法实现彩色技术, 由于彩色粘接剂特性与彩色墨水类似, 通过混合渐变可实现真彩色制件打印. 最新款 ZPrinter850 配有 5 个打印头 (无色、青色、品红、黄色和黑色), 能打印出 39 万种颜色.

Mcor 公司⁴⁾ 的 Mcor IRIS 真彩色 3D 打印装备采用 LOM 技术, 配有墨盒, 根据每层的颜色将纸张双面用普通彩色打印机打印成彩色, 再切出所需轮廓并粘接, 能打印出 100 万种以上的接近真实色彩的 3D 模型.

以色列火龙理工学院的 Studio Under 工作室⁵⁾ 开发了一种彩色陶瓷 3D 打印技术, 将特制的彩色粉末混入陶瓷黏土中, 然后用挤出式的 3D 打印喷头打印出来, 从而得到彩色陶瓷制品.

BotObjects 公司⁶⁾ 开发的 ProDesk3D 彩色 3D 打印装备采用 FDM 技术, 将 5 种颜色的线材在调色打印头中进行色彩的调配, 这种技术还存在很多问题, 如线材的控制和混合、喷头内残余材料的去

2) Stratasys Official Site. <http://www.stratasys.com/>.

3) 3D Systems Official Site. <http://www.3dsystems.com/>.

4) Mcor Official Site. <http://www.mcor technologies.com/>.

5) Studio Under of Holon Institute of Technology Official Site. <http://www.studiounder.com/>.

6) BotObjects Official Site. <http://www.botobjects.com/>.

除等. 美国麦迪逊大学开发出一种彩色打印转接器 Spectrom⁷⁾, 该转接器与 FDM 3D 打印机相兼容, 在塑料熔化时加入染色剂, 从而打印出不同颜色. 意大利的 Stick Filament 公司⁸⁾提出在棒状线材的两端加上可以相互扣合的连接头, 这样不同颜色的 PLA 线材就可以被连接在一起进行彩色 3D 打印.

2.2 功能梯度材料 3D 打印

功能梯度材料^[4]通过有针对性地改变材料组分的空间分布, 以达到优化结构内部应力分布、满足不同部位对材料使用性能的要求, 在航天航空、医学等众多领域有巨大应用前景. 3D 打印技术是制造非均质零件特别是功能梯度材料零件的一种具有先天优势的重要方法, 能克服传统制备方法的生产效率低、梯度成分的连续性和精确性难以把握、生产成本较高等缺陷.

美国里海大学的 Liu 等^[7]利用 LENS 技术制备了 Ti/TiC 功能梯度材料, 其组分变化由一边的纯 Ti 变化到另一边的 95% 的 TiC. 美国康涅狄格大学的 Wang 等^[8]采用多层彩色喷墨打印技术制备出 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 功能梯度材料. 董江等^[9]采用同步送粉在铜板上激光熔覆制备了 Co-Ni-Cu 梯度涂层. 华中科技大学史玉升等^[10]2006 年申请了关于一种快速制造功能梯度材料的制备方法的专利.

2.3 多尺度工艺结构一体化 3D 打印

3D 打印技术是由点到面、由面到体的堆积成形, 在获得零件宏观结构的同时, 又能控制微观组织结构, 可实现多尺度工艺结构一体化制造, 为生物组织器官制造、金属组织定向结晶组织结构制造、光子晶体制造等多个研究领域提供新途径.

多数 3D 打印技术一般需要添加工艺支撑等结构才可以制造包含悬臂、裙边等特征的制件, 为了实现对 3D 制件在重量、结构强度、翘曲变形方面的控制, 也需要设计、制造特定的工艺结构. 近年来, 随着 3D 打印软件及控制技术的不断发展, 通过实时精确控制成形过程中的能量、气氛、温度等工艺参数, 已经可以直接制造出微观尺度的工艺结构, 实现性能 — 材料 — 结构一体化设计制造. 德国马克斯·普朗克 (Max Planck) 生物物理化学研究所的 Wanke 等^[11]通过研究光子带隙微观结构的激光快速成形方法, 制备出了 66 和 133 μm 的三维网格, 这种结构可以控制材料的光学性能. 澳大利亚昆士兰大学的 Sercombe 等^[12]研究了铝质零件的快速成形制造方法, 其突出特点是在铝粉成形后烧结工艺中通入氮气, 使得铝基体中形成坚硬氮化铝网架, 从而改进了材料的组织性能, 并保证了制造的自由性和零件的制造精度. 西安交通大学的李涤尘等^[5]通过控制激光金属直接成形过程环境温度等工艺参数, 可以控制零件内部组织定向结晶组织的形成.

2.4 3D 打印向多种工艺协作复合成形方向发展

在金属激光 3D 打印成形技术中, 由于激光逐层加工金属粉末材料固有的球化效应及台阶效应, 即使采用目前精度最高的 SLM 技术, 其 3D 打印制件在表面精度、表面粗糙度等指标上距离直接应用还存在较大差距. 解决上述问题的最佳方法是将激光 3D 打印技术 (增材制造) 与传统的机加工技术 (减材制造) 在加工过程中结合起来, 在逐层叠加成形的过程中即进行逐层的铣削或磨削加工, 这样可以避免刀具干涉效应, 成形件加工完成后无需后处理即可直接投入使用, 是目前复杂金属模具制造的最新发展趋势. 日本松浦机械制作所已经研制成功了融 SLM 3D 打印工艺和切削加工于一体的加工装备 LUMEX Advance-25 (中文名“金属光造型复合加工机”), 已开始应用于制作家电模具, 有望使

7) Spectrom3D Official Site. <http://www.spectrom3d.com/>.

8) Stick Filament Official Site. <http://www.stickfilament.com/>.

传统制作模具时间缩短一半以上. DMG Mori 最近推出的 Lasertec 65 混合铣床提供了另外一种将激光 3D 打印 (基于涂覆技术) 与铣削加工复合成形的方法, 可以实现复杂的金属零件制造. 上述技术均要求工艺规划软件将 3D 打印工艺与传统工艺相结合, 生成协同工作的加工指令并付诸实施.

3 多色、多材料、多尺度工艺结构 3D 打印技术的实现方法

3.1 面向 3D 打印的产品设计方法

传统的面向制造与装配设计^[13](design for manufacturing, DFM) 方法目的在于设计出的产品易于制造和装配, 从而缩短开发周期、降低产品成本. 3D 打印技术使得产品的外形不再是制造的难点, 因此, 为了达到高性能, 产品往往几何外形复杂, 导致模型特征数量陡增; 另外, 包括从宏观到微观的工艺结构的设计, 都是传统 CAD 技术无法实现的^[14]. 传统 CAD 技术及软件仍然主要针对单材均质模型设计优化: 设计方法上以边界表示 (boundary representation, B-Rep) 和构造表示 (constructive solid geometry, CSG) 技术为主导, 侧重复杂形貌特征的表面建模, 而 CSG 技术仅适用于相对简单形状的实体建模, 难以有效地设计和表达复杂的功能梯度材料制件的材料配比变化及多尺度工艺结构特征, 仅仅依靠多个均质模型之间的装配来表达复杂模型将大大增加设计的复杂度且限制了模型的可表达范围, 缺乏有效的能表达上述信息的 3D 模型数据交换标准.

为了充分发挥 3D 打印技术的优势, 促进 3D 打印技术的快速发展, 美国材料与试验协会 2011 年提出了新的增材制造文件格式 (additive manufacturing file format, AMF^[15]), 基于可扩展标记语言 (extensible markup language, XML), 弥补了 CAD 数据和现代的 3D 打印技术之间的差距. 相比原来的 (stereolithography, STL) 格式, 克服了其精度不高、数据冗余大、工艺信息缺失、文件体积庞大、读取缓慢等缺点, 同时引入了曲面三角形、颜色贴图、异质材料、功能梯度材料、微结构、排列方位等高级概念. 其中, 曲面三角形能够大幅提升模型的精度, 其是利用各个顶点法线或切线方向来确定曲面曲率的, 在进行数据处理切片时, 曲面三角形可进行细分, 便于获得理想精度. 不同区域的材料成分表达是通过空间点坐标公式来表述的, 按常数比例混合的材料即为均质材料, 按坐标值线性变化的比例即为梯度材料, 还可表达非线性梯度材料. 当材料比例被赋为“0”时, 即表示该处为孔洞. 颜色元素指定 sRGB 色彩空间内的红、绿、蓝以及透明度值, 且小区域的颜色属性将覆盖大区域颜色属性. 因此, AMF 格式包含的工艺信息更全、文件体积更小、模型错误更少, 使得 3D 打印过程中使用起来更加方便, 模型设计过程也更加轻松.

要实现全信息的 3D 打印, 首先需要设计出包含这些信息的三维实体模型, 然后通过数据处理、工艺规划等, 最后进行 3D 打印. 然而, 由于 AMF 模型文件的设计与传统仅仅表达几何外形的设计方法差异较大, 还没有出现能支持 AMF 格式完整功能的相关设计工具, 无法提供全工艺信息的数据来源, 3D 打印软件也无法对 AMF 文件的全部信息予以支持.

面向 3D 打印设计^[14] (design for additive manufacturing, DFAM) 方法, 与 DFM 方法不同, 这种新的设计方法旨在综合设计产品的外观、多尺度结构以及材料, 以达到产品性能的最优化设计. 一体化的设计方法不但可以减少部件数量、避免装配问题, 还能提高产品综合性能, 定制化的设计能满足用户需求, 设计过程中也无需考虑传统加工方法的限制, 真正实现了产品的材料、工艺、结构的一体化自由设计. 美国航天军工 Aerojet Rocketdyne 公司使用 3D 打印技术制造了一台完整的发动机, 并成功通过测试, 一台典型的同类发动机需要几十个不同的零件组成, 而这台发动机的零部件被合并至只有三个, 包括喉部和喷嘴部、燃油器和圆顶组件、燃烧室. 设计和制造过程只用了几个月, 以往需要大

约一年的时间, 成本节约了 65%.

要实现 DFAM 方法的前提是要掌握材料、工艺、结构一体化的建模方法. 材料建模的目的是定义几何区域内的材料分布情况, 为满足 3D 打印技术对于材料建模的需求, 需要做大量研究工作.

杨继全等^[16]通过引入描述各材料物理特征的材料分布特征值、各材料的体分量和材料分布向量, 对材料切片内的特征节点进行材料赋值, 并对节点间的材料进行插值运算, 层层遍历赋值, 从而实现了对于异质材料零件中任意点结构与材料信息的表述. 吴晓军等^[17]提出了一种基于体素模型的功能梯度材料/零件建模方法. Biswas 等^[18]提出一种采用反距离加权法进行空间参数化方法来表征材料成分变化.

为支撑 3D 打印技术进行多尺度工艺结构的成形, 在建模过程中完成对模型微观结构的描述十分重要. Olson^[19]把系统工程思想引入到材料设计和结构制造过程中, 提出了多层次结构的计算机辅助设计技术, 认为材料设计、结构制造是一个系统工程, 不同尺度下的组织结构决定了其各自的性能特点, 而且工艺、组织、性能之间关系的良好集成能够实现多尺度结构设计概念^[5].

3.2 多色、多材料、多尺度工艺结构 3D 打印工艺规划与加工控制技术的实现

综上所述, 传统的表面模型 (STL 模型) 已经不再适用于多色、多材料、多尺度工艺结构的 3D 打印, 必须采用诸如 AMF 等新一代能表述实体内部材料、工艺结构特征信息的实体模型才可以满足其数据来源需要. 与此对应, 传统 3D 打印技术的数据处理过程也将发生大幅度的更改, 以往 STL 文件数据处理最核心的环节是离散分层切片, 其切片结果为连续小线段组成的一系列轮廓环来指示实体的边界, 该结构为连续小线段, 其缺点是损失了轮廓精度, 且无内部实体材料与工艺结构信息. 因此现代 3D 打印数据处理流程中的 2D 层面数据将逐步转换为采用样条曲线轮廓 + 光栅网格的混合数据结构. 构造样条曲线轮廓无损描述曲面三角形的离散化切片轮廓, 且各个曲线节点不仅存储几何信息, 还存储包括色彩在内的表面工艺信息, 由此实现高精度、无信息损失的外轮廓数据表达; 采用光栅网格表达模型内部的材料及结构信息, 将基于区域 (Region) 模型、基于空间域函数描述梯度材料以及微工艺结构信息离散化到光栅网格的每个节点上. 由此该层面数据可统一描述 3D 打印所需的全部工艺信息, 包括多材料、多色、多尺度工艺结构.

在控制技术方面, 多色、多材料、多尺度工艺结构 3D 打印的主要转变是, 更倾向于采用阵列式喷头实现多种材料 (或色彩) 的同步喷出, 以往主流的基于高能束 (激光或电子束) 成形的 3D 打印技术相对难以实现多材料、多色的高效率打印, 因此基于光栅扫描的控制方式将在未来 3D 打印技术中占据更加重要的地位. 由于各种 3D 打印技术基本原理均基于由面到体的增材制造方式, 其工艺处理流程虽然千差万别, 但内部的数据流程均可抽象为 3D 模型到 2D 层面数据, 再到 1D (或光栅结构) 加工路径 (指令) 的逐步降维的解构过程与反向的加工过程. 且各类 3D 打印装备的驱动控制方法基本可抽象为 3 种运动: 直角坐标系运动 (含各种串并联机构运动与激光振镜扫描或二者的复合); 光栅扫描 (含面曝光技术和阵列喷射成形); 以及多自由度关节臂运动或这 3 种运动的复合. 基于上述抽象, 可以将多色、多材料、多尺度工艺结构 3D 打印加工指令统一为下述 3 种指令集合: (1) 运动指令, 描述材料输送系统或能量束的几何运动轨迹; (2) 光栅指令, 适应于阵列喷射成形、面曝光 SLA 等小平面整体成形的加工工艺; (3) 针对多激光并行加工及各个辅助轴、材料配比系统及温控系统的需要, 引入多指令流的概念: 各个指令流可并发同步执行, 在同步、延迟、解除同步指令的控制下, 可统一描述预热、多组分材料制备与输送、多激光并行加工等复杂的加工细节. 基于上述二维层面数据结构与控制指令即可, 可有效地面对多色、多材料、多尺度工艺结构 3D 打印技术的要求.

4 总结

多色、多材料、多尺度工艺结构的 3D 打印技术突破了传统制造技术在材料复杂性、层次复杂性和功能复杂性上的瓶颈, 在消费、生物医学和航天航空等众多领域均有着繁杂高层次需求, 是 3D 打印技术未来发展的主要趋势. 以 AMF 为代表的实体模型数据交换格式、基于阵列喷射成形技术的 3D 打印工艺是实现多色、多材料、多尺度工艺结构的 3D 打印技术的重要手段. 在此基础上展开的实体模型建模技术、全工艺信息 2D 模型切片算法、基于抽象指令控制工艺规划算法将是未来 3D 打印技术的重要研究方向.

参考文献

- 1 Han X, Yang E Y. The Rapid Prototyping Technology and Application. Beijing: China Machine Press, 2012 [韩霞, 杨恩源. 快速成型技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 2012]
- 2 Lu B H, Li D C. Development of the additive manufacturing (3D Printing) technology. Mach Build Automat, 2013, 42: 1-4 [卢秉恒, 李涤尘. 增材制造 (3D 打印) 技术发展. 机械制造与自动化, 2013, 42: 1-4]
- 3 Wang F Y. From social computing to social manufacturing: the coming industrial revolution and new frontier in cyber-physical-social space. Bull Chin Acad Sci, 2012, 27: 658-669 [王飞跃. 从社会计算到社会制造: 一场即将来临的产业革命. 中国科学院院刊, 2012, 27: 658-669]
- 4 Niino M, Hirai T, Watanabe R. M space application of advance structure materials. J Japan Soc Compos Mater, 1987, 13: 257-264 [新野正之, 平井敏雄, 渡边龙三. 倾斜机能材料 — 宇宙机用超耐热材料应用. 日本复合材料学会志, 1987, 13: 257-264]
- 5 Li D C, He J K, Tian X Y, et al. Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures. J Mech Eng, 2013, 49: 129-135 [李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造. 机械工程学报, 2013, 49: 129-135]
- 6 Sugavaneswaran M, Arumaikkannu G. Modelling for randomly oriented multi material additive manufacturing component and its fabrication. Mater Design, 2014, 54: 779-785
- 7 Liu W P, DuPont J N. Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by laser engineered net shaping. Scripta Mater, 2003, 48: 1337-1342
- 8 Wang J W, Shaw L L. Fabrication of functionally graded materials via inkjet color printing. J Am Ceram Soc, 2006, 89: 3285-3289
- 9 Dong J, Liu F, Chen S Y, et al. Preparation of Co-Ni-Cu gradient coatings by CO₂ laser cladding on copperplate. J Northeast Univ Nat Sci Edit, 2008, 29: 1581-1584 [董江, 刘芳, 陈岁元, 等. 铜板上激光熔覆制备 Co-Ni-Cu 梯度涂层. 东北大学学报 (自然科学版), 2008, 29: 1581-1584]
- 10 Shi Y S, Huang S H, Lu Z L, et al. A preparation method for functionally gradient materials in rapid manufacturing. China Patent, ZL200610018290.8, 2006-01-24 [史玉升, 黄树槐, 鲁中良, 等. 一种快速制造功能梯度材料的制备方法. 中国发明专利, ZL200610018290.8, 2006-01-24]
- 11 Wanke M C, Lehmann O, Müller K, et al. Laser rapid prototyping of photonic band-gap microstructures. Science, 1997, 275: 1284-1286
- 12 Sercombe T B, Schaffer G B. Rapid manufacturing of aluminum components. Science, 2003, 301: 1225-1227
- 13 Boothroyd G. Design for Manufacturing and Assembly. Beijing: China Machine Press, 1999 [布斯劳. 面向制造与装配的产品设计. 北京: 机械工业出版社, 1999]
- 14 Gibson I, Rosen D W, Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. New York: Springer, 2010
- 15 Hiller J, Lipson H. STL 2.0: a proposal for a universal multi-material additive manufacturing file format. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF'09), Austin, 2009. 266-278
- 16 Yang J Q, Zhu Y F, Li J B, et al. Point clouds based digital model for heterogeneous objects. China Mech Eng, 2012, 20: 2453-2458 [杨继全, 朱玉芳, 李静波, 等. 基于空间点云数据的异质材料零件动态建模方法. 中国机械工程, 2012, 20: 2453-2458]
- 17 Wu X J, Liu W J, Wang T R. Functionally graded material modeling based on 3D voxel models. Comput Integr Manuf Syst, 2004, 10: 270-275 [吴晓军, 刘伟军, 王天然. 基于三维体素模型的功能梯度材料信息建模. 计算机集成制造

系统, 2004, 10: 270–275]

- 18 Biswas A, Shapiro V, Tsukanov I. Heterogeneous material modeling with distance fields. *Comput Aid Geom Design*, 2004, 21: 215–242
- 19 Olson G B. Computational design of hierarchically structured materials. *Science*, 1997, 277: 1237–1242

The development of 3D printing technology and its software implementation

SHI YuSheng*, ZHANG LiChao*, BAI Yu & ZHAO ZuYe

State Key Laboratory of Materials Processing and Mold & Die Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

*E-mail: shiyusheng@hust.edu.cn, dr.teac@gmail.com

Abstract With the continuous development of 3D printing (3DP) technology, the limitations of traditional single-material homogeneous processing technology have already been transcended. Parts with multi-materials, functionally graded materials (FGM), or colorful and true color surface texture mapping can be manufactured directly, and such manufacturing can span multi-scales (from microstructure to macrostructure at the part level). By combining 3DP with traditional processing technology, new processing methods with different types of both precision and geometric complexity can be achieved. In this paper, research and development on the aforementioned technologies at home and abroad are summarized, and the countermeasures required to meet the latest development of 3DP are discussed in terms of traditional modeling technology, 3DP data exchange format, and data processing software architecture.

Keywords 3D printing, multi-materials, colorful surface, hierarchical structure, AMF



SHI YuSheng was born in 1962. He is Secretary of the party general branch of College of Materials Science & Engineering (HUST), Deputy of Advanced forming technology and equipment engineering laboratory of Hubei province, Co-chairman of China 3D printing technology Industry Alliance. The executive director of Non-Traditional Machining of China, Vice director of China Rapid prototyping Committee, Chairman of 3D printing technology Industry

Alliance of Hubei province, Chairman of Hubei Aeronautical Society, Vice chairman of World 3D Printing Technology Industry Alliance.



ZHANG LiChao was born in 1975. He received the Ph.D. degree in Institute of Materials from the Huazhong University of Science and Technology, WuHan, in 2002. Currently, he is a Associate Professor of College of Materials Science & Engineering (HUST). His research interests include 3D printing, CAM, CNC and machine vision.