

快速制造技术的发展现状 及其展望

Current Situation and Prospect of Rapid Manufacturing Technology

北京清华大学机械系先进成形制造教育部重点实验室 张人佶 林峰 王小红 张磊 张婷



张人佶

清华大学机械工程系教授、博士生导师。专业及研究方向为快速成形制造、生物制造工程、表面工程。担任10余项国家级项目负责人,获国家科技进步奖二等奖1项,北京市科技进步奖一等奖和二等奖各1项,教育部科技进步奖三等奖1项。在核心期刊发表论文200余篇,其中SCI收录60余篇,发表专著2部,译著1部。

快速制造技术及其主要应用

随着世界电气化及信息化的不断融合,全球化浪潮席卷世界的每个角落。面对消费者日益膨胀的个性化需求及制造业内愈演愈烈的竞争,推陈出新已成为企业生存发展的根

快速成形制造(RPM)技术自20世纪80年代问世以来,一直保持着迅速发展的势头,进入21世纪,其发展更加为人们所重视,并被称为快速制造(Rapid Manufacturing, RM)技术。利用快速成形制造的方法直接制造三维金属零件是当前国际快速原型技术研究的热点之一,其研究的目标是生产制造小批量且具有复杂形状和较高使用性能的功能零部件。

本,高度柔性的设计和生产成为必然趋势。产品创新对于企业赢得竞争具有极端的重要性,产品快速开发的支撑技术之一即是快速制造技术^[1]。

快速成形制造(RPM)技术自20世纪80年代问世以来,一直保持着迅速发展的势头,进入21世纪,其发展更加为人们所重视,并被称为快速制造(Rapid Manufacturing, RM)技术。利用快速成形制造的方法直接制造三维金属零件是当前国际快速原型技术研究的热点之一,其研究的目标是生产制造小批量且具有复杂形状和较高使用性能的功能零部件^[2]。具有权威性的Wohlers报告中预测,21世纪,快速制造技术将会逐渐占据快速成形制造技术应用领域的主导地位^[3]。

快速成形过程中使用的热源有

激光束、普通光束、电子束、离子束及普通加热热源等,其中激光是目前使用较多的加工能源之一。快速成形制造技术的成形方法多达30余种,目前应用较多的有立体光固化成形(Stereo Lithography Apparatus, SLA)、熔融沉积制造(Fused Deposition Modeling, FDM)、激光选区烧结(Selective Laser Sintering, SLS)、激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)和叠层实体制造(Laminated Object Manufacturing, LOM)等。这些工艺方法都是在材料离散/堆积成形原理的基础上,结合材料的物理化学特性和先进的工艺处理方法而形成的,它与其他材料学科的发展密切相关。快速成形制造技术重要的技术特征之一是材料制备与材料成形过程的集成,因为离散/堆积过程要

求材料具有更严格的低收缩率、适当的流动性和粘性等性质。如果将原型件直接作为小批量模具使用,也必须考虑材料具有足够的机械性能和导热性能等。另外,特殊功能材料的快速制造在生产生活中发挥着越来越重要的作用,可以制造出具有特定电、磁学性能(如超导体、磁存储介质)的产品;组织工程材料快速成形制造及其在生物制造工程中的应用,将是21世纪继信息产业之后最重要的科学研究和经济增长热点。

快速制造技术发展的关键技术

由于我国的快速制造技术已经达到一定的水平,围绕产品创新所需的快速制造技术的发展,笔者提出如下关键技术。

1 快速成形制造设备的机电一体化技术

快速成形制造设备通常都是机电一体化的产品,这一点以前并没有引起业内人士的足够重视。通过赴国外考察,并且具体分析国产的快速成形制造设备与国外名牌产品的差距,认识到必须统筹考虑,实现快速成形制造设备的机电一体化,才能够使得快速成形制造设备的质量有较快速度的提高。如何开展这个技术的研发,与一般的机电产品有所不同,应当注意如下关键问题:

(1)使设备能可靠而准确地传递欲测的机械应变,将测量精度提高,才能够提高成形件制品的精度,从而提高快速成形制造设备的档次。

(2)设备的控制系统应当用高标准要求,选用比较精确的系统,虽然这会引入设备制造成本的增加,但是在采取措施使得市场趋向成熟的基础上,这可以被市场接受。

(3)设备的软硬件联调往往不被生产厂家所重视,这样,即使采用与国外设备同样的部件,也不会达到国外名牌产品的水平,所以,我们的

工作应当落到实处,注意联调过程的规范化。

(4)采用技术手段消除并减小温度、湿度和电磁场干扰等外界因素引起的基底层和成形层的层间零点漂移,可以进一步扩大快速成形制造设备的使用范围,并提高成形件的精度。

2 构建多样化的基于微滴喷射的快速成形制造系统

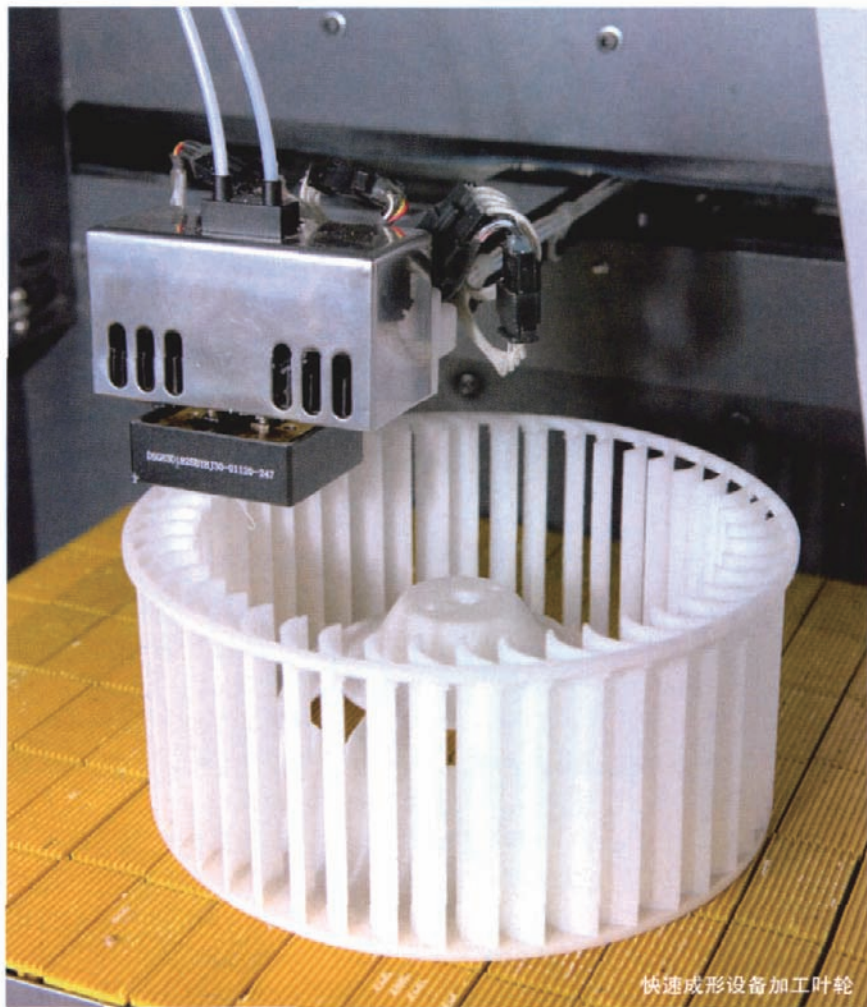
快速制造技术根据其使能技术可分为高能束(包括激光、电子束等)技术和微滴喷射技术,后者因成本低廉、成形精度中等、易于小型化、容易操作等优点而受到重视,特别是国内产品通过市场竞争,取得了比较好的业绩。目前,为使这一大类的产品更上一层楼,更好地挡住进口产品的冲击,在技术上应当采用多样化技术。

(1)一机多用,如一台设备,既可用单喷头,亦可用双喷头或多喷头,既可用丝材,又可用颗粒材料,成形室的温度可调等,其中的关键技术是功能的切换。

(2)一种机型,应当确定其主要的的应用范围,同时,还应当注意其他应用范围。对于这些方面给予重视,会非常有利于销售。应用的多样化是一个涉及面非常广的、对技术要求非常高的问题。

(3)成型材料形成系列,例如,可用ABS丝材,亦可用PC(聚碳酸酯)丝材,如果使用可溶性丝材打底,以后去除基底就特别方便。

(4)从熔融挤压类型的机型拓展,配合应用于生物制造快速成形制造系统的发展,开展技术攻关,可使快速制造领域在更加广阔的天地



快速成形设备加工叶轮

得到应用。

3 加速研发电子束的选区熔化和选区烧结快速成形制造设备

我国以前对于采用激光束的快速成形技术已经给予了大量的支持,产生了良好的效果,已经有多家企业在基于激光束的快速成形制造设备方面取得了进步。与激光束相比,电子束具有一些非常明显的优点,如能量利用率高、加工材料广泛、无反射、加工速度快、真空环境无污染及运行成本低等,在金属零件的快速制造中,利用电子束进行成形制造是很有前途的发展方向,以下的关键技术值得引起重视。

(1) 基于电子束的快速制造系统以电子枪为基础,主要包括成形机构子系统、电子束扫描子系统、电子枪子系统、控制子系统、观察检测子系统和环境保障子系统等6个子系统等。如何使之协调发展,是一个关键。

(2) 6个子系统中,电子枪子系统最具有特点,其大功率、精聚焦、易操纵、可维护这4个方面的特点,均需深入研究,这是国内尚无定型产品的主要原因。

(3) 由于电子束速度极快(约0.5倍光速),控制其大幅度快速偏转比较困难,所以其扫描子系统和控制子系统如何协同作用,真正实现高精度的成形,是又一个需要从产品化角度进行研究的问题。

(4) 为了对复杂形状的三维零件进行快速制造,获得形状比较精确并且具有较高致密度和较好组织形态的金属零件,需要与材料学相互支持,开展研究。

4 用于产品设计评估以及设计质量检验的系统

对于产品创新设计,快速成形机有着非常广泛的用途,如果解决了以下关键问题,快速成形机就可以对这种设计进行评估,并且对设计质量进行检验,并且形成一个评估检测系

统。

(1) 完成快速成形机的标准化工作,这对于进行本项任务极其重要,这样就可以避免采用不同的快速成形机会对所评估的产品设计结果得到不一致的结论。

(2) 国内不同企业生产的快速成形机,与相关的软件相结合,可以用于产品设计,但是如何对设计质量进行检验,业界人士认为最好是用快速成形机按照标准很快地制造出一个样件,按照人们共同约定的程序,可请第三方做设计质量检验。

(3) 首先明确测试的目的,正确地选定测试方案,验证设计理论、设计方法,鉴定产品是否符合要求以及样件质量。

(4) 实际上,用于产品设计的评估,往往不需要进行全部的考核,而需对其中的标志性结果进行认定,因此需要就这种结果进行广泛而深入的研究,取得共识。

5 产品异地设计,异地快速制造以及异地检测系统

随着互联网的广泛应用,产品设计与制造越来越在更广的范围,甚至是全球来进行,异地空间不再遥远,因此,开发与互联网相结合的异地制造系统,显得尤为必要。

(1) 根据生产企业的设想,在更广的范围甚至是全球选择制造伙伴,是许多业内人士的理想,互联网使得设想可能变为事实,其基础是产品异地设计、异地快速原型制造以及异地检测系统的构建。

(2) 把不同地区的智力资源和过剩的制造能力,通过互联网与异地企业组成网络联盟,其前提和技术关键是这里所说的完善的系统,对此必须进行基础性研究。

(3) 必须针对全过程来进行生产安排,制定严格的工程制度,使得产品异地设计、异地快速原型制造以及异地检测可以顺利进行。

(4) 大部分设计人员和厂商希

望能直接制造出金属零件,因此,快速制模也是产品创新中的关键技术,可以归结为本系统,亦可以作为另一个辅助系统(属于快速模具技术范畴)。

典型工艺及其分析

经过近20年的发展,快速成形制造已经进入技术成熟、稳步发展的阶段,出现了30几种工艺,主要有立体光固化(Stereo Lithography, SL)、激光选区烧结(Selective Laser Sintering, SLS)、激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)、电子束熔化(Electron Beam Melting, EBM)、叠层实体制造(Laminated Object Manufacturing, LOM)、三维打印(Three Dimensional Printing, 3DP)、三维绘图(Three Dimensional Plotting, 3D Plotting)、熔融沉积制造(Fused Deposition Modeling, FDM)、激光近净成形(Laser Engineering Net Shaping, LENS)、等离子喷射沉积成形(Plasma Deposition Manufacturing, PDM)、无木模铸型制造(Patternless Casting Modeling, PCM)等。以下举例说明。

1 电子束选区熔化工艺

电子束选区熔化(Electron Beam Selective Manufacturing, EBSM)在航空航天零件制造方面的优势包括:真空环境下成形保证了成形零件的内在品质,特别适合成形航空航天领域常用的钛金属材料;属于小批量、个性化制造,不受零件数量的限制;可以成形任意形状的零件,不受零件形状复杂程度的影响;能量利用率高,运行成本低;成形速度快,依靠磁偏转线圈进行扫描成形,无机械运动惯性等^[4]。

电子束快速制造技术可以成形高熔点、易氧化等难加工金属,具有特殊的应用价值。采用三维扫描方式,由虚拟现实软件规划电子束在X-Y平面内的二维扫描轨迹;同时通过调节聚焦电流控制电子束焦点

平面在Z方向上的移动,可实现电子束三维扫描控制。采用平稳连续的铺粉方式、成形过程动态监控以及底板紧固、粉末预热等方法,开展变长线扫描工艺。试验后可知,通过控制工艺参数,可以快速制造出合格的金属件。清华大学为波音公司 Phantom Works Business Unit 采用 EBSM 工艺制作的 Ti6Al4V 拉伸试件的拉伸强度达到 1080 MPa,断后延伸率为 9.7%,达到了委托单位的要求。

2 熔融沉积制造工艺

FDM 是一种利用喷头熔融、挤出丝状成形材料,并在控制系统的控制下,按一定扫描路径逐层堆积成形的一种快速成形工艺。采用此法成形的零件具有较好的综合机械性能,随着 ABS、PC、PC/ABS、PPSF 等高性能材料的成功研制,熔融挤出制造工艺已经直接生产出具有优良综合性能的零件,可以直接满足电子产品、汽车仪表盘等方面的使用要求,甚至可以满足某些对零件性能要求较为苛刻的场合。如美国 Stratasys 公司为其大型熔融挤出制造设备开发了高性能的 PC 基材料来实现直

接功能零件的制造。Stratasys 公司的 Quantan 设备曾在 4h 内使用 PC 材料为某生产线制造了一带轮,用以替换生产线上已经损坏的铝制带轮。该带轮在生产线上正常工作了长达 4 个星期之久。下图为采用熔融沉积快速成形工艺制作的涡轮外壳模型,材料为 ABS 工程塑料,模型长度约为 350mm,宽度约 300mm,上、下件模型图(a)装配而成图(b),其配合精度相当高。

3 生物材料低温沉积制造工艺

目前已经有许多生物材料快速成形制造工艺,美国 Drexel 大学开发的多喷头的设备包含气压、压电、螺杆和精确挤出 4 种喷头。该设备可基于熔融沉积制造(FDM)和类似 3D Bioplotter 的交联成形工艺,在高温下可成形 PCL 等材料,在室温下则可以成形藻酸盐及其与细胞的混合物。与国外相比,我国的生物制造工程领域所开发的设备,从装备的先进性、使用的广泛性、设备的自动控制程度等方面是比较领先的。

在我国,相关研究也非常多,最新的成果为采用功能区域/界面隔离层/单一细胞的组织工程骨-软骨构建思想,通过孔隙率低、微孔尺寸小的隔离层将支架及复合的细胞分割成骨诱导功能区域和软骨诱导功能区域,利用骨髓腔和关节腔两种不同的生物环境达到骨和软骨分别再生。为此,开发了成形梯度材料支架的新工艺,即基于低温冷冻成形、相分离和粒子滤去/浸出工艺的复合喷射制造工艺,可成形具有材料、宏观孔隙结构和微观孔隙结构梯度的组织工程支架。该工艺可成形材料范围广,孔隙结构和孔隙率控制范围大,是目前为止唯一可成形胶原支架的快速

成形工艺。该工艺在要求支架具有复杂材料及结构组成的多组织同时修复、复杂器官构建等问题中具有重要的研究价值及应用价值。以清华大学机械系利用自行开发的多喷头生物材料快速制造系统为例,该系统采用含多种细胞的细胞/生物材料,不同的喷头喷射出性能不同的混合材料(细胞可以视作特殊的材料),由受控组装过程构建的含管网的类肝结构体。

结束语

当前,我国在快速制造方面与国际先进水平并无很大的差距,在某些方面(例如生物材料快速制造系统)还保持着自己鲜明的特点,有一定优势,呈现出蓬勃发展的良好势头。虽然这些成绩喜人,但是还必须认真地分析本领域技术现状及与国际先进水平的差距,采取有力的措施对这个新的高技术行业加以支持与保护,否则很容易丧失其地位,再去追赶则需要投入更多、更费精力,事倍而功半。

参考文献

- [1] Yongnian Yan, Renji Zhang, Feng Lin. Research and application on bio-manufacturing. Proceedings on International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping. 2003, 10, 23-30, 1-4.
- [2] 颜永年, 张人佶. 加速发展我国的快速成形技术. 电加工与模具, 2002, (5): 1-4.
- [3] Wohlers T. Wohlers Report 2007: rapid prototyping & tooling-state of the industry. Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates, Inc., Colorado, USA, 2007.
- [4] Cansizoglu O, Harrysson O, Cormier D, et al. West and T. Mahale. Properties of TiC6AlC4V non-stochastic lattice structures fabricated via electron beam melting. Materials Science and Engineering A, 2008, 492: 468-474.
- [5] Liu L, Xiong Z, Zhang R. et al. A novel osteochondral scaffold fabricated via multi-nozzle low temperature deposition manufacturing. J. Bioactive and Compatible Polymers, 2009: 24(S1): 18-30. (责编 淡蓝)



(a) 上、下件模型



(b) 装配件

FDM工艺制作的涡轮外壳模型