

1.1 增材制造技术的基本概念

增材制造(additive manufacturing, AM)属于一种制造技术。它依据设计的三维 CAD 模型数据,通过数字驱动逐层堆积的方式将粉材、丝材、液材和片材等各种形态的材料成形为三维实体。

自 20 世纪 80 年代开始,增材制造技术逐步发展,其间也被称为“材料累加制造”(material increase manufacturing)、“快速原型”(rapid prototyping)、“分层制造”(layered manufacturing)、“实体自由制造”(solid free-form fabrication)、“三维喷印”(3D printing)等。在我国早期,被称为“快速成形”“快速制造”或“快速成形制造”等,不同的叫法分别从不同侧面表达了该技术的特点。

从加工过程材料的变化角度看,制造技术可分为以下 3 种形式:

(1) 等材制造。如铸造、锻压、冲压、注塑等方法,主要是利用模具控形,将液体或固体材料成形为满足设计形状和性能的构件。

(2) 减材制造。一般是指利用刀具或电化学方法,去除毛坯中不需要的材料,剩下的部分即满足设计形状的构件。

(3) 增材制造。利用粉材、丝材、液材和片材等形态的材料,通过某种方式逐层堆积成复杂形状和多种性能的物体。

等材制造中的铸造工艺有 3000 多年的历史;减材制造中的切削加工有 300 多年的历史;增材制造中的 3D 打印仅有 30 多年的历史。

增材制造具有明显的数字化、智能化特征,其工作过程可以分为如下两个阶段:

(1) 数据处理过程。对计算机辅助设计的三维 CAD 模型进行平面或曲面分层“切片”处理,将三维 CAD 数据分解为若干二维数据。

(2) 叠层制作过程。依据分层的二维数据,采用某种工艺制作与数据分层厚度相同的薄片实体,将每层薄片叠加起来,构成三维实体,从而实现从二维薄层到三维实体的制造。从数学角度看,数据从三维到二维是一个“微分”过程,数据从二维薄层叠加成三维实体是一个“积分”过程。由于增材制造工艺将三维复杂结构降为二维结构进行叠层制造,降低了制造维度,所以其在制造复杂结构(如栅格、内流

道等)方面较传统方法具有突出优势。

采用增材制造技术,人们可以发挥最大的想象力,创造各种各样的成形方法。例如:采用光化学反应原理,研发出光固化成形方法;利用叠纸切割的物理方法,研发出叠层实体制造方法;利用喷胶黏结方法,研发出三维喷印成形方法;利用金属熔焊原理,研发出金属熔覆成形方法等。上述多种成形方法表明,增材制造技术已经从传统制造技术向多学科融合发展,物理、化学、生物和材料等学科新技术的发展给增材制造技术注入了新的生命力。增材制造给制造业带来了巨大的变革,有可能彻底改造传统的制造模式,使人人都成为设计者、创造者和制造者变为可能。

增材制造包括 3D 打印(三维几何空间: $X+Y+Z$)、4D 打印(3D 打印+时空)、5D 打印(4D 打印+生命)、6D 打印(5D 打印+意识)等,其发展历程和技术特点见图 1-1。3D 打印可成形任意复杂形状的结构/功能构件;4D 打印可成形可控的智能构件;5D 打印可成形可控的生命器官;6D 打印可成形可控的智慧物体。

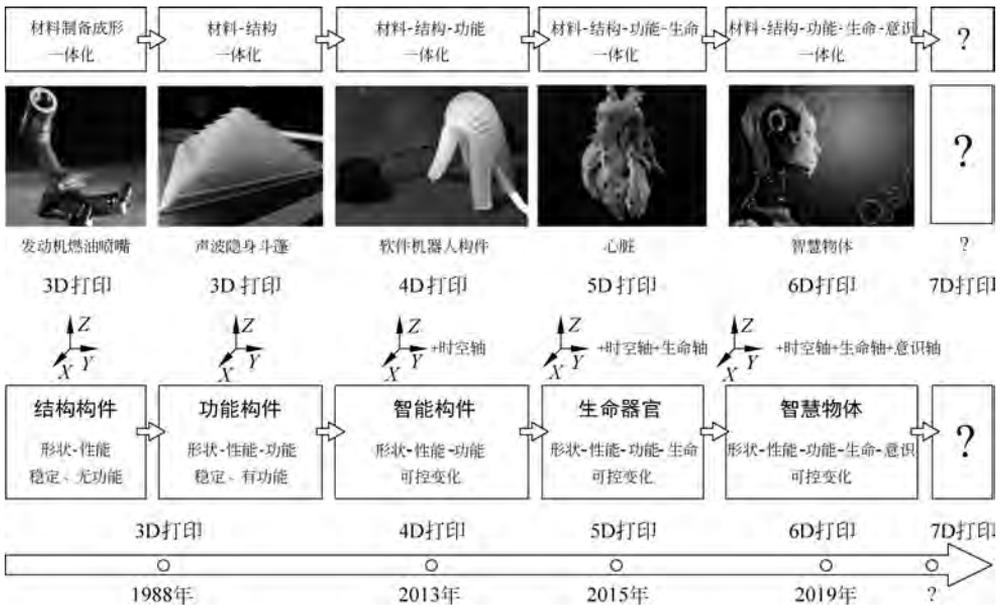


图 1-1 增材制造的分类、发展历程和技术特点

1.2 增材制造技术产生的背景

第一阶段,思想萌芽。增材制造技术的核心思想最早起源于美国。早在 1892 年,美国的 Blather 就在其专利中提出了利用分层法制作地形图。1902 年,美国的 Carlo Baese 在一项专利中提出了用光敏聚合物分层制造塑料件的原理。1940 年,Perera 提出切割硬纸板并逐层黏结成三维地图的方法。直到 20 世纪 80 年代

中后期,增材制造技术才开始了根本性发展,出现了一大批专利,仅在1986—1998年间注册的美国专利就达20多项。但这期间增材制造仅仅停留在设想阶段,大多还是一个概念,并没有付诸应用。

第二阶段,技术诞生。标志性成果是5种主流增材制造技术的发明。1986年,美国UVP公司的Charles W. Hull发明了光固化成形(stereo lithography appearance,SLA)技术;1988年美国的Feygin发明了叠层实体制造(laminated object manufacturing,LOM)技术;1988年美国Stratasys公司的Crump发明了熔融沉积成形(fused deposition modeling,FDM)技术;1989年美国得克萨斯大学的Deckard发明了激光选区烧结(selective laser sintering,SLS)成形技术;1993年美国麻省理工学院的Sachs发明了三维印刷(three dimensional printing,3DP)成形技术。

第三阶段,装备推出。1988年,美国3D Systems公司根据Hull的专利,制造出第一台增材制造装备SLA 250,开创了增材制造技术发展的新纪元。在此后的10年中,增材制造技术蓬勃发展,涌现出了10余种新工艺和相应的成形装备。1991年,美国Stratasys公司的FDM装备、Cubital公司的实体平面固化(solid ground curing,SGC)装备和Helisys公司的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SLS装备研制成功。1994年,德国EOS公司推出了EOSINT型SLS装备。1996年,3D Systems公司制造出第一台3DP装备Actua 2100。同年,美国ZCorp公司也发布了Z402型3DP装备。总体上,美国在增材制造装备研制和生产销售方面占全球的主导地位,其发展水平及趋势基本代表了世界增材制造技术的发展历程。另外,欧洲和日本也不甘落后,纷纷进行了相关技术研究和装备研制。

第四阶段,应用推广。随着材料、工艺和装备的日益成熟,增材制造技术的应用范围由模型和原型制作进入产品快速制造阶段。早期增材制造技术由于受到材料种类和工艺水平的限制,主要应用于模型和原型制作,如制作新型手机外壳模型等,因而被称为快速原型(rapid prototyping,RP)技术。

上述5种主流工艺代表了早期的经典增材制造技术。新兴增材制造技术则强调直接制造可装机使用的构件,如金属结构件、高强度塑料构件、陶瓷构件、金属模具等。高性能金属构件的直接制造是增材制造技术由“快速原型”向“快速制造”转变的重要标志之一。2002年,德国研制出激光选区熔化(selective laser melting,SLM)装备,可成形接近全致密的精细金属构件和模具,其强度可达到同质锻件水平。同时,电子束选区熔化(electron beam melting,EBM)装备、激光近净成形(laser engineering net shaping,LENS)装备等金属直接制造装备也涌现出来。这些装备面向航空航天、生物医疗和模具等高端制造领域,直接成形结构复杂和高性能的金属构件,解决了难加工材料和复杂结构的整体制造难题,因此增材制造技术的应用范围越来越广泛,价值越来越明显。

1.3 增材制造技术的发展

1.3.1 增材制造技术在国外的发展概况

国外增材制造技术的发展主要集中在欧美地区,其中美国是增材制造技术的发源地,也是对此技术研究和应用最广泛的国家。美国得克萨斯大学奥斯汀分校的自由曲面制造实验室(Laboratory for Freeform Fabrication)是世界上最早成立的增材制造技术研究中心之一,研究领域涵盖了增材制造技术的各个方面;美国得克萨斯大学埃尔帕索分校设立的3D创新中心(W. M. Keck Center for 3D Innovation)联合了新墨西哥大学、扬斯敦州立大学、洛克希德·马丁公司、诺斯罗普·格鲁曼公司和Stratasys公司,重点研究用于航空航天系统的增材制造技术;美国宾夕法尼亚州立大学联合巴特尔纪念研究所(Battelle Memorial Institute)和西亚基公司(Sciaky Corporation)成立了数字沉积创新材料加工中心(Center for Innovative Materials Processing through Direct Digital Deposition),重点偏向金属、高分子等材料的设计及工业应用研究。欧美地区其他发达国家在各地的科研单位也设立了增材制造技术研究中心。例如,英国谢菲尔德大学设立了先进增材制造中心(Centre for Advanced Additive Manufacturing),重点研究喷墨打印、生物材料激光成形、航空材料激光选区熔化成形、增材制造构件的结构设计、激光选区烧结新材料研究等方向;英国诺丁汉大学成立了增材制造创新中心(EP SRC Centre for Innovative Manufacturing in Additive Manufacturing),针对多功能3D打印技术、3D打印材料体系设计等方面进行创新突破;英国埃克塞特大学设立的添加层制造中心(Centre for Additive Layer Manufacturing)致力于解决增材制造技术与工业应用结合的难题;德国弗朗霍夫激光研究所成立了弗朗霍夫增材制造联盟,着眼于金属、高分子、陶瓷及生物材料的增材制造技术研究,其下属11个研究中心遍布全国;法国设立了陶瓷技术转让中心(Center for Technology Transfers in Ceramics, CTTC),利用喷墨打印、黏结喷射、陶瓷直接沉积等增材制造技术成形难加工脆性材料;比利时鲁汶大学机械工程学院则针对增材制造技术种类进行了深入研究,并应用于实际生产。除了上述欧美国家的科研单位,澳大利亚莫纳什大学成立的莫纳什添加剂制造中心(Monash Centre for Additive Manufacturing)拥有世界上最大的激光选区熔化装备 Concept Laser X-Line 1000,并在2015年成形出世界上第一个全金属航空发动机结构样件。新加坡也成立了增材制造中心,研究面向未来制造、海洋应用、医疗组织和建筑打印,几乎囊括了食品、金属、生物等各个领域的增材制造装备,致力于打造东南亚的增材制造强国。

1.3.2 增材制造技术在中国的发展概况

自20世纪90年代初开始,以清华大学、华中科技大学、西安交通大学和北京

隆源公司为代表的几家单位,在国内率先开展增材制造技术的研发。清华大学开展了 FDM、EBM 和生物 3DP 技术的研究;华中科技大学开展了 LOM、SLS、SLM 等增材制造技术的研究;北京隆源公司重点研发和销售 SLS 装备;西安交通大学重点研究 SLA 技术,并开展了增材制造生物组织方面的应用研究。随后又有一批高校和研究机构参与到该项技术的研究之中。北京航空航天大学 and 西北工业大学开展了 LENS 技术研究,中航工业航空制造工艺研究所和西北有色金属研究院开展了 EBm 技术的研究,华南理工大学、南京航空航天大学开展了 SLM 技术的研究等。国内高校和企业通过技术研发和装备产业化改变了该类装备早期依赖进口的局面,通过 20 多年的技术研发与应用推广,在全国建立了数十个增材制造服务中心,用户遍布航空航天、生物医药、汽车、船舶等行业,改进和提升了我国的传统制造业。

1.4 增材制造技术的特点

1. 适合复杂结构的快速制造

与传统机加工和模具成形等工艺相比,增材制造技术将三维加工变为若干二维加工,大大降低了成形的复杂度。理论上,只要在计算机上设计出加工对象的三维模型,都可以应用该技术在无需刀具、模具及复杂工艺条件下快速地将“设计”变为“现实”。成形过程几乎与加工对象的复杂度无关,可实现“自由制造”,这是传统加工技术无法比拟的。应用增材制造技术可成形出传统方法难加工(如自由曲面叶片、复杂内流道等)甚至是无法加工(图 1-2)的非规则结构,可实现构件结构的复杂化、整体化和轻量化制造,尤其是在航空航天、生物医药等领域具有广阔的应用前景。



图 1-2 采用增材制造成形的复杂镂空构件

2. 适合个性化定制

与传统大规模批量生产需要大量工装和装备等相比,增材制造技术在快速生产和灵活性方面极具优势。从设计到制造,中间环节少,工艺流程短,特别适合于

医疗、文化创意等个性化定制、小批量生产以及产品定型之前的验证性制造,可极大降低制造成本和周期。

3. 适合高附加值产品制造

增材制造技术的诞生仅 30 多年的时间,相比于传统制造技术非常年轻和不成熟。现有大多数增材制造技术工艺的加工速率(主要指单位时间内制造的体积或质量)较低、构件成形尺寸受限(最大约为 2m)、材料种类有限;主要应用于成形单件、小批量的中小尺寸制造,在大规模生产和大尺寸制造等方面不具优势。因此,增材制造技术适合应用于航空航天、生物医疗、珠宝设计等领域中高附加值产品的制造。

1.5 增材制造与制造业提升



立体打印

1.5.1 增材制造技术提供制造业创新原动力

1. 拓展产品创意与创新空间,提升原创能力

创新设计必须考虑实际制造能力,因此不得不牺牲一些创新设计的思想。而增材制造技术则为人们提供了充分想象和创造的平台,可以说“只要你能想到,我就可以做出来”“只有想不到,没有做不到”。与传统的切削加工相比,增材制造技术将三维加工变为若干二维的堆积成形,大大降低了制造复杂度。理论上,只要在计算机上设计出结构模型,就可以应用该技术在无需刀具、模具及复杂工艺条件下快速地将设计变为实物(图 1-3)。产品制造过程几乎与构件的结构复杂性无关,可实现自由制造,这是传统制造方法无法比拟的。设计人员不再受传统制造工艺和资源的约束,只需专注于产品形态创意和功能创新,在“设计即生产”“设计即产品”理念下,追求“创造无极限”。

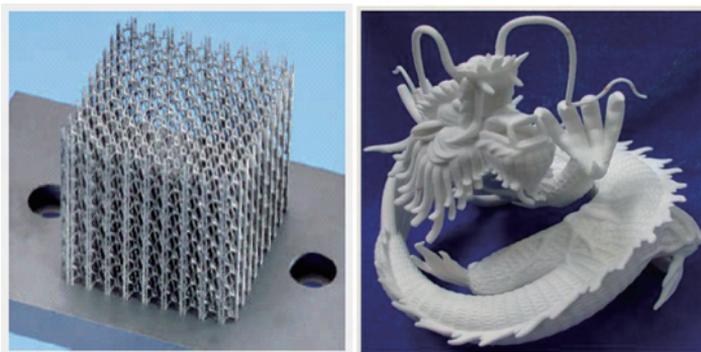


图 1-3 采用增材制造成形的复杂结构

2. 降低产品创新研发成本,缩短创新研发周期

设计方案进行仿真优化后,将其三维数据转换为标准数据格式(如 STL 文

件),然后导入增材制造装备中,直接制造出产品。由于简化或省略了工艺准备、试验等环节,产品数字化设计、制造、分析高度一体化,新产品开发定型周期显著缩短,成本降低,“今日完成设计,明天得到成品”得以实现。

以汽车发动机缸盖为例,如果采用传统砂型铸造,工装模具的设计制造周期需要5个月左右,但若采用增材制造技术,1个星期左右就可以整体成形出四气门六缸发动机缸盖砂型。又如,模具是机械、家电、数码等构件制造的基础工具。在批量生产过程中,模具的冷却是关键环节。传统制造工艺往往是利用机加工方法在模具上钻直孔,随着产品结构越来越复杂,直孔冷却难以达到快速和高效的冷却效果,有时甚至会导致产品变形和失效。为此,开发随形冷却技术,即冷却流道尽量与成形产品复杂轮廓保持一致,是提升模具功能的核心内容之一。传统机加工无法制造这种冷却系统,但采用增材制造技术则可实现。德国EOS公司使用增材制造技术制造了具有随形冷却流道的注塑模具镶块,使注塑周期由90s缩短为40s,并且每年可生产40000个构件。该镶块单套花费3.25欧元,相对于传统制造工艺节省了19.444欧元。因此,增材制造技术的应用极大地促进了传统模具的技术进步。

1.5.2 增材制造技术提升制造业工艺能力

1. 少无应力装配整体制造,提高产品质量与性能

增材制造在满足整体化、个性化制造的同时,产品质量与性能也随之大大提高。据悉,一架空客A380飞机或波音747飞机,分别有450多万个构件。从理论上讲,构件越多越不安全,结合部往往就是隐患所在。增材制造技术可以将原来难以整体成形的多个构件集成为一个整体制造出来,减少构件数量。这不但大大减少了装配工作,也使其安全性和可靠性随之提高。现在,增材制造技术已经成功应用到F-18战机和波音787客机的关键构件制造中。例如,每架F-18战机有80多个采用激光增材制造成形的构件;波音787商用喷气式飞机上有32个采用激光增材制造成形的构件,这也是增材制造技术首次应用于大型喷气式飞机,具有里程碑意义。另外,增材制造技术可以优化设计,根据实际需求制造出轻量化构件。这一点对“为减轻一克质量而奋斗”的航空航天企业特别有价值。例如,整体制造内部中空结构,但外形合适、性能优良的构件,用来代替原来那些实心的笨重构件,应用于战机、战车、舰船等武器装备,可有效减轻其质量,从而增加载弹量,极大地提升战斗力。

2. 制造传统工艺无法加工的构件,极大增强工艺实现能力

增材制造突破了结构几何约束,能够制造出传统方法无法加工的非常规结构,这种工艺能力对于实现构件轻量化、优化性能有极其重要的意义。增材制造技术可以将设计者从传统构件制造的思想束缚中解放出来,使其将精力集中在如何更好地实现功能的优化,而非构件的制造上。

3. 提高难加工材料的可加工性,拓展工程应用领域

增材制造技术可以整体成形传统制造方法难以加工的形状和材料。使用高能束整体成形钛合金、镍基高温合金(图 1-4)、陶瓷(图 1-5)等难加工材料,拓展了高性能材料的工程应用范围。



图 1-4 整体式镍合金转子



图 1-5 生物陶瓷材料人体器官修复体

1.5.3 增材制造技术实现制造业绿色可持续发展

增材制造技术有助于推进绿色制造。传统的机械加工方式通过去除材料的方式得到构件,会产生大量的边角料和切屑,不仅材料利用率低,而且使用的切削液和产生的切屑等会对环境和人体产生危害。采用增材制造技术,超过 90% 的原材料可回收再用,具有明显的节能、节材、减排和无污染的特点。

另外,采用增材制造技术,可将构件内部设计为网状结构(图 1-6),替代实心,以减少材料使用量,降低制造时间和能源消耗量。具有网状内部结构的钛合金发动机叶片,材料使用量减少 70%,SLM 制造时间减少 60%。

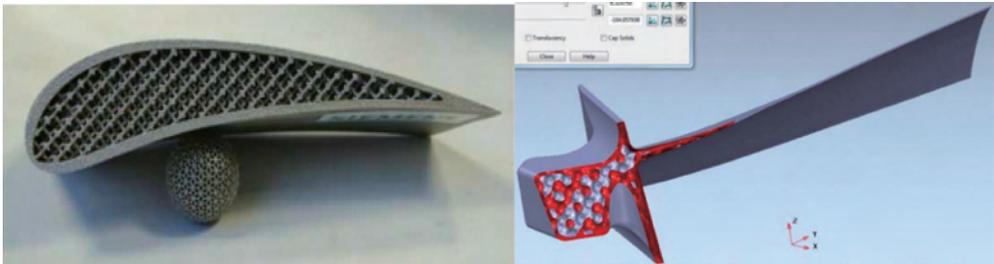


图 1-6 增材制造网状内部结构

增材制造技术在构件修复领域也得到了广泛应用。美国桑迪亚(Sandia)国家实验室和空军研究实验室、英国劳斯莱斯(Rolls-Royce)公司、法国阿尔斯通(Alstom)

公司以及德国弗劳恩霍夫(Fraunhofer)研究所等均对航空发动机涡轮叶片和燃气轮机叶片的激光熔覆修复工艺进行了研究,并成功实现了定向晶叶片的修复。此外,美国国防部研发的“移动构件医院”将增材制造技术应用于战场环境,可以对战场破损构件(如坦克链轮、传动齿轮和轴类构件等)进行实时修复,大大提高了战场环境下的机动性。

1.5.4 增材制造技术催生新的制造模式

1. 变革传统制造模式,形成新型制造体系

集成与融合材料、信息、设计、工艺、装备等,生产个性化、高性能、复杂构件的增材制造技术将全面变革产品研发、制造、服务的模式。

增材制造技术及其制造模式对社会发展方式转变的重要作用日益突出。增材制造技术可直接制造产品,不再需要模具和多级装配,过去的企业和车间可能化简为一台装备,社区和家庭制造可能成为未来生产模式,物流配送环节会大幅减少,地区制造资源差别会减少,集中式的生产模式向分散制造模式转变。

增材制造技术的应用一方面将提升中小企业自身的制造能力,另一方面将催生为广大中小企业提供产品增材制造服务的新模式,培育专业化服务制造企业,从而实现“泛在制造”和“聚合服务制造”的新局面。

2. 支撑个性化定制等高级创新模式实现

增材制造技术使“按需而制”“因人定制”和“泛在制造”等得以实现。增材制造技术的应用将彻底改变传统大规模生产方式单纯追求批量和效率易导致产品供过于求的弊端,促进“按需而制”或“因人定制”的产品个性化制造模式变革,既能实现单件小批量工业产品的制造,又能极大地满足人们生活丰富多彩的需求。增材制造技术的应用将消除传统的产品研发与生产明确分工的界线,化繁琐的业务集成为简约的业务统一,促进产品设计与制造的一体化、高度集成化制造模式的变革,实现“设计即生产”和“设计即产品”。

从产业层面来讲,面对后经济危机时代的挑战,各国都在寻求新的经济增长点和着力培育具有竞争优势的新兴产业,大批量制造已经使得成本和利润不断降低,个性化制造成为社会新的增长点,以增材制造技术为代表的个性化制造产业发展将成为未来拉动经济发展的关键产业。增材制造技术适合多品种个性化制造。增材制造过程不需要模具,产品的单价几乎和批量无关,特别适合小批量产品的制造。对于传统制造业,新产品投入市场极具风险,如果不能被市场接纳,会给企业带来巨大损失。增材制造技术在新产品开发和大批量生产中极具优势,企业可以进行多品种个性化制造,甚至可以提供定制。

从社会层面讲,增材制造技术是继计算机、互联网技术之后又一逐渐应用到百姓生活的技术。利用增材制造技术,可让社会民众充分参与产品的创造,个人的创造力将被极大释放,人的想象力不再被实现手段所制约。创新源泉不断涌现,其直接结果

就是社会创造能力不断提升。人们可以实现个性化、实时化、经济化的产品生产和消费,这种产业模式会逐步改变世界的经济格局,也逐步改变人类的生活方式。

3. 催生专业化创新服务模式

历史发展进程表明,工业革命是社会进步的源泉和动力,会引发整个社会的巨大变革。如同蒸汽机、福特汽车流水线引发的工业革命,增材制造技术作为“一项将要改变世界的技术”,已引起全球关注。英国《经济学人》杂志(2012年第3期)则认为增材制造技术将“与其他数字化生产模式一起推动实现第三次工业革命”,并认为生产制造将从大型、复杂、昂贵的传统工业过程中分离出来,凡是能接上电源的任何计算机都能够成为灵巧的生产工厂,增材制造象征着个性化和创新制造模式的出现。人类将以新的方式合作进行创造和生产,制造过程与管理模式将发生深刻变革。随着增材制造技术应用的不断拓展,它将不再局限在制造技术领域,而将成为社会创新的工具,使得人人都可以成为创造者,支撑创新型社会的发展。

增材制造技术正在孕育未来工业企业的雏形。人们可以在网站上建立共享创意设计数据的产品库,将自己的设计模型数据上载到网站,需要者可以从网上下载设计模型数据,用增材制造装备制作自己的产品。如美国的 Shapeways 和 Quirky 两家公司已开展了这方面的探索。

Shapeways 公司于 2007 年创立于荷兰,后将总部移至美国纽约市,获得了数千万美元的风险投资。2012 年 10 月,该公司在纽约皇后区的“未来工厂”投入运营。“未来工厂”里的机器,就是 50 台工业 3D 打印机,通过互联网,接受顾客的各种产品的三维设计方案,并在数天内完成产品的打印生产,然后寄送给客户。同时,该公司还为商家和设计者建立了平台,使他们可以再利用该公司的 3D 打印机生产并销售自己设计或收集的产品(图 1-7)。

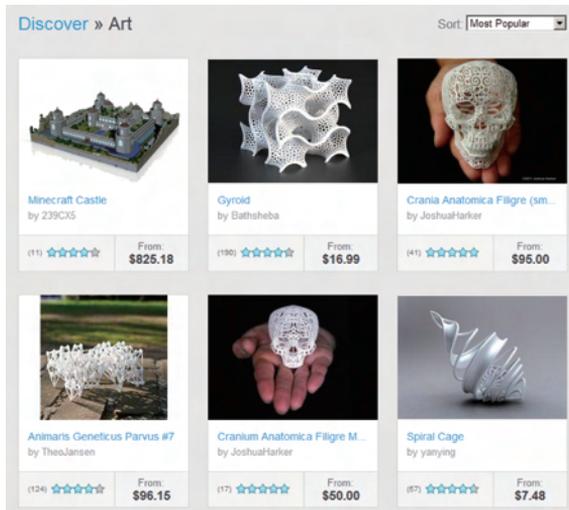


图 1-7 Shapeways 公司网页界面