

# “3D 打印”给铸造业带来的机遇与挑战

黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

“3D 打印”(3D Printing)的专业术语是“增材制造”(Additive Manufacturing),其技术内涵是通过数字化增加材料的方式实现结构件的制造。

诞生于上个世纪八十年代末期的增材制造技术是制造技术原理的一次革命性突破,它形成了最能代表信息化时代特征的制造技术,即以信息技术为支撑,以柔性化的产品制造方式最大限度地满足无限丰富的个性化需求。

1892 年一个立体地形模型制造的美国专利首创了叠层制造原理,在其后的一百年间,类似的叠层制造专利有数百个之多,实践中的技术探索也层出不穷。但以 1988 年第一台可以工业应用的立体光刻机器的诞生为标志,以快速满足柔性化需求为主要应用目标的现代增材制造技术才真正形成。可以说,如果没有 CAD 实体模型设计 and 对其进行分层剖分的软件技术,没有能够控制激光束按任意设定轨迹运动的振镜技术、数控机床或机器人,增材制造技术的柔性化特征就只能停留在一种理想化的原理层面。因此,增材制造技术应该被称之为信息化增材制造技术或数字化增材制造技术。作为信息化时代的代表性制造技术,增材制造技术是应该得到大力支持的前沿技术发展方向,是使我国在信息化时代,特别是当前回归实体制造业的世界潮流中占领制造技术领域国际制高点的优先发展方向。

2012 年 3 月发布的美国“国家制造业创新网络”计划(National Network for Manufacturing Innovation-NNMI)拟投入 10 亿美元联邦资金资助建立 15 个先进制造技术协同创新中心。2013 年 8 月,美国政府高调宣布成立国家增材制造创新中心(NAMII-National Additive Manufacturing Innovation Institute),作为这 15 个计划中的先进制造技术协同创新中心中首先成立的示范性中心(Pilot institute),奥巴马总统强调这个研究中心的成立是强化美国制造业的重要步骤。英国国家技术战略委员会“未来的高附加值制造技术展望”报告,也把增材制造作为提升国家竞争力,应对未来挑战的 22 个应优先发展技术之一。当前,增材制造技术已在全世界范围内成为众所瞩目的热点。

自立体光刻技术诞生以来,产生了很多构思奇妙的增材制造技术,对制造技术的发展起到了极大的推动作用。但大多数增材制造技术主要是应用于快速原型制造,所以一度被冠以“快速原型制造”技术的名称。快速原型制造技术为铸造提供了快速制造铸型的新的技术手段,给铸造业带来新的发展机遇。但增材成形原理绝非只能用于成形,也可以解决高性能的需求。上个世纪 90 年代中期以来发展起来的金属高性能增材制造技术,解决了兼顾复杂形状和高性能金属构件快速制造的技术难题,因而可以用于高性能金属零件的直接制造,它对铸造业则既带来机遇也有挑战。

作为最基本的工业制造技术之一的铸造技术,在增材制造技术迅猛发展的时代里将会遇到怎样的机遇与挑战呢?

增材制造技术为铸造业带来的机遇主要有以下几方面:

## (1) 快速制造铸造模型

它为铸造业带来的益处主要有:加快铸造新产品研发速度,降低工艺研究成本与风险,满足单件与小批量需求市场。铸造工艺是从制造铸模开始的。对于精度和性能要求高、结构复杂的铸件,制定合适的铸造工艺并不是一个简单的任务,它常常挑战铸造工艺师的智慧与技术水平。一些高难度的铸件往往需要数年的研究才能确定最终的铸造工艺,而制作铸造模具往往是铸件工艺研发过程中最费时费钱的环节。大致有三种快速制造铸型的增材制造方式:①增材制造塑料模型,从其翻制铸型;②增材制造蜡模,翻制熔模模型壳;③采用 SLS 技术(选区激光烧结)直接制造树脂砂型。相

比模具制造，这些方法制造铸型具有十分显著的速度快、成本低优势，因此非常适合于需要反复试验铸造工艺的高难度铸件研制场合。待工艺定型之后再制造模具进行大批量生产。而对于单件和小批量市场需求，可以直接用增材制造技术快速制造铸型完成任务，无需模具制造环节。从大约二十年前开始，铸造厂就在购买快速成形机进行铸造模型的快速制造，而今天大多数铸造厂都拥有了快速成形机。可见，增材制造技术显著增强了铸造业的技术能力，将逐渐成为铸造业必不可少的辅助技术之一。

### （2）激光组合制造增强铸造业对市场需求的适应能力

激光立体成形是最重要的金属高性能增材制造技术之一。同锻造、铸造和机械加工等传统制造技术结合，形成激光组合制造技术，是激光立体成形技术一个十分重要的发展方向。没有任何一种技术是十全十美以致能覆盖任何工艺需求，而相互结合，取长补短则是最明智的选择。增材制造技术的工艺灵活性和柔性化的特点，使得以其为基础发展激光组合制造技术具有十分重要的实用价值。最为重要的是，激光立体成形技术可以把异质材料结合成一个高性能的整体构件，这是激光组合制造的技术思路赖以实用的必要基础。西北工业大学采用激光立体成形技术在 In961 合金铸件上成形了 GH4169 合金的复杂结构，形成一个高性能结合的整体构件，成功地解决了我国某型先进航空发动机研制中长期不能解决的技术难题。该铸件研制三年，浇注一百多个铸件，没有一个合格品。而激光组合制造件一次成功，一个月内为发动机装机试车提供了合格零件。可见，对于某些单用铸造工艺难以解决的制造技术难题，激光组合制造提供了一条新的技术途径。善用激光组合制造技术，将增强铸造业对市场需求的适应能力。



图1 西北工业大学激光组合制造航空发动机零件（下部为 In961 不锈钢铸件，并经局部激光修复；上部为 4169 镍基合金激光成形体）

### （3）高性能成形修复减少高端铸件的废品率，满足产品进度要求

有一个十分值得关注的趋势是：虽然激光立体成形技术最初主要是作为一种致密金属零件的高性能快速制造技术而发展起来的，但工业界却越来越关注它作为一种高性能成形修复技术的巨大技术优势。除了航空航天领域外，机械、能源、船舶等领域的大型装备的高性能快速修复都对激光立体成形技术提出了迫切的需求。据报道，美国采用激光立体成形技术维护的军事装备资产达 40 亿美元/年，在飞机、陆基和海基系统都配备了激光立体成形系统。激光成形修复的主要优点是：①修复件的力学性能高，可以达到铸件以至锻件新件的性能要求；②修复件的变形很小，可以在大面积薄壁零件上进行大体积增材修复；③可以进行成形修复，恢复具有复杂形状结构的损伤局部的形状和性能。一些机械装备的高端零件，过去由于缺乏适当的修复技术而不得不报废，其所带来的不仅是昂贵的经济损失，由于这些零件的制造周期一般很长，重新制造新件往往显著延缓产品交付时间，有时成为更难以接受的问题。激光立体成形技术甚至可以修复极其昂贵的航空发动机和燃气轮机单晶涡轮叶片，这是金属单晶零件唯一可能的修复技术。

增材制造技术为铸造业带来的挑战则主要是在高性能复杂结构件直接制造方面。金属高

性能增材制造技术可以兼顾复杂形状结构精密成形和高性能制造，且在这两方面都优于铸造。在结构复杂度方面，增材制造几乎可以制造出任意可以想象的形状结构，包括复杂内腔结构。增材制造因为是数控制造，在形状精密度方面远远优于铸造。复杂结构件铸造时，由于铸芯和活动模块安装精度、铸造时位置移动等造成的尺寸偏差，在增材制造过程中都不存在。增材制造过程影响尺寸精度的唯一因素是结构的热应力变形，这是增材制造复杂精密结构件目前还只限于小尺寸零件（一般小于 300mm）的主要原因。增材制造金属零件的表面粗糙度也已经达到与熔模精密铸造相当的水平。大多数人在不太熟悉金属高性能增材制造技术的情况下，往往想当然地以为增材制造零件的力学性能不会很高，甚至以为它低于铸件的性能。实际上，增材制造金属零件的力学性能一般远高于铸件，而与锻件相当。原因在于金属高性能增材制造零件没有常规铸造零件的宏观偏析、缩松和组织粗大等缺陷。金属高性能增材制造零件的材质是全致密或极为接近全致密。由于凝固发生在浅小熔池中，固液界面十分平坦，金属补缩通道永远是开敞的，增材制造过程不会产生常规铸造难以避免的缩松缺陷。金属高性能增材制造技术包括以同步送粉激光熔覆为主要技术特征的激光立体成形技术（Laser Metal Deposition-LMD）和以粉末床为主要技术特征的选区激光熔化技术（Selective Laser Melting-SLM）两个技术方向。激光立体成形技术制造的零件是百分之百致密的，而 SLM 技术制造的零件偶尔可能会有少量极小的孔洞（一般小于 50 $\mu\text{m}$ ），相对于铸件的缩松孔洞可以忽略不计。同样由于熔池尺寸十分微小（亚毫米至数毫米级），增材制造过程不会产生宏观偏析缺陷，在整个零件尺度上化学成分是完全均匀的。增材成形过程中，成形件除了同十分洁净的保护性气氛或真空接触外，不接触任何其他介质，因而不会在制造过程中产生成分污染。金属高性能增材制造的凝固速度远远高于常规铸造过程，处于快速凝固和近快速凝固范围，因而凝固组织十分细小，所有这些因素成就了金属高性能增材制造零件优越的力学性能。还有人担心增材制造的“离散堆积”过程制造条件的波动造成不可控制的冶金缺陷而影响零件性能的一致性。如果制造条件控制不好，增材制造过程当然可能产生材料组织结构不一致，从而导致性能不一致的问题。这个问题，可以通过对增材制造的主要影响因素及其波动范围对材料组织和性能的影响规律透彻把握和增材制造装备优越的控制性能来解决。我们在为中国商飞公司增材制造 C919 飞机大型钛合金结构件时，成形件的强度一致性达到了小于 2% 的波动范围，远远高于中国商飞公司提出的 5% 的强度一致性要求。静态性能、疲劳性能的分散度很小，这说明金属高性能增材制造完全可以实现高度的力学性能一致性。从另一方面看，“离散堆积”制造过程首次提供了可以逐点控制制造条件的可能性，从而为更高水平的性能一致性奠定了基础。所以可以期待增材制造技术在未来实现比现有各种制造技术都更为优越的力学性能。实现这种新的技术可能性，需要对金属高性能增材制造过程进行十分深入细致的科学研究。

就金属高性能增材制造技术目前的发展水平，对铸造业的挑战还是极为有限的，主要有以下几个原因：①高昂的制造成本，大体上在每公斤数千元至数万元之间；②不能兼顾大尺寸和高精度；③达到工业化成熟程度的成形材料的种类还很少。然而，从发展的眼光看，这几个问题都可以逐渐解决。与所有初期高成本的新技术一样，增材制造成本有大幅度降低的空间；兼顾大尺寸和高精度，以及可制造广泛的金属材料种类这两个问题，都可以通过充分的研究工作予以解决。

中国铸造业应当充分认识增材制造技术的特点和发展状况，以充分利用其给铸造业带来的机遇，并有效应对其挑战。