

增材制造 (3D 打印) 发展趋势

卢秉恒*, 李涤尘, 田小永

摘要: 增材制造又称为 3D 打印, 在过去 30 年间取得了快速发展并展示出前所未有的发展潜力。同时, 这项发展潜力巨大的技术对传统工业也产生了不可估量的影响。3D 打印技术将会推动生产模式的变革, 通过实现 5 个“任意”的工艺发展, 将会为制造行业带来一个以定制化制造为特征的新时代。3D 打印的技术进步及其与传统制造工艺的融合, 将推动制造业在材料研发、产品设计、生产工艺等方面进一步创新发展。最终, 3D 打印技术将与等材制造、减材制造形成三足鼎立局面, 共同分享整个社会的制造业价值。

关键词: 增材制造, 3D 打印, 制造模式, 定制化制造, 创新设计

1 前言

作为一项制造技术, 3D 打印引起了全球学术界、企业界和商界的广泛关注和极大兴趣, 引起了社会空前的热议。

从制造技术概念来说, 与传统的等材制造 (制造过程中 $\Delta M = 0$) 和减材制造 ($\Delta M < 0$) 等制造技术相对应, 3D 打印是一个增材制造 ($\Delta M > 0$) 技术。等材制造技术有 3000 多年历史, 如中国的三星堆铜铸造技术; 以中国春秋战国时期的干将莫邪剑和秦始皇兵马俑为标志的金属材料热处理、焊接技术有近 2500 年的历史。机械动力的发展, 尤其是在电磁场理论指导下电机的发明, 产生了机床和切削加工, 也已有近 300 年的发展历史。而增材制造的第一台光固化激光原型样机诞生至今不足 30 年, 时间相对短暂, 但潜力巨大。3D 打印技术发展前景之广阔, 使我们对 3D 打印及其产业的前景难以准确判断, 只能尽我们的眼界, 预测若干近期发展方向的可能性。

2 3D 打印技术发展推动生产模式变革

2.1 3D 打印使制造走向 5 个“任意”

3D 打印的技术创新如雨后春笋般出现, 针对塑料、金属、陶瓷、木材、食材、建材、导电纤维、磁性钢、石墨烯等形形色色材料的 3D 打印工艺与装备正在研究与探索中 [1]。

由于 3D 打印采用叠加法原理, 将三维实体的制造降阶为二维截面的制造, 所以可制造任意复杂形状的零件, 包括空心结构零件 [2]。

3D 打印工艺具有卓越的柔性, 可胜任任意批量的制造任务, 既可以打印个体匹配的人工骨、牙齿, 也可以打印模具 [3]。3D 打印成本低, 周期短, 可能成为今后汽车模具的主要生产方式。同时, 3D 打印可解决复杂形状及多材料结构制造问题, 同样适用于大批量定制化制造。

3D 打印工艺和装备的发展, 使人们可以在企业、办公室, 甚至在家里完成制造任务; 当 3D 打印逐渐为大众所掌握时, 每个家庭就可以适时地打印出自己设计的家庭器具 (台灯、衣架等家庭用品) 及维修家用器具的零配件。太空 3D 打印也正在探索中, 太空建筑、航天维修件甚至卫星体将来都可以在太空实现打印 [4–6]。总之, 未来将实现在太空、企业、办公室和家庭等任意场合进行 3D 打印。

3D 打印已开始形形色色的应用领域崭露头角。例如, 在航空航天领域中, 既可以用于大型柔性结构件和小型复杂承力件的制造, 也可以用于发动机及其控制器中精密零件的制造 [6]; 建筑领域将功能不同的建筑结构划分为承力结构与装饰性结构 [7], 3D 打印在装饰性建

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

* Correspondence author. E-mail: bhlu@mail.xjtu.edu.cn

Received 3 March 2015; received in revised form 25 March 2015; accepted 31 March 2015

© The Author(s) 2015. Published by Engineering Sciences Press. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

引用本文: Bingheng Lu, Dichen Li, Xiaoyong Tian. Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing. *Engineering*, DOI 10.15302/J-ENG-2015012

筑构件的制造方面必将大放异彩。

任意材料、任意形状、任意批量、任意领域及任意工作场地等 5 个“任意”是 3D 打印的突出优势。总之，3D 打印可以适用于任何材料，打印任意结构，适应任意批量的制造，可在任意的地点进行打印，应用于各种领域。同时，各学科交叉又促进了 3D 打印技术的迅猛发展。

2.2 3D 打印将开创以个性化制造为主流的新时代

3D 打印不再需要准备复杂的模具，编制复杂的加工程序，或准备专门的工装夹具和刀具。3D 打印将广泛应用于航空航天、机电产品的样机开发。工业品、重大装备的研究开发将越来越依赖 3D 打印技术支撑的物联网平台。3D 打印特别适用于具有个性化要求的典型场合，如人工内植物（骨替代假体、假牙）、医疗康复器具等产品的制造。随着信息技术的发展，人类迎来了可穿戴信息类产品的时代，这些产品均需要个性化制造，而 3D 打印将是最为适宜的制造方法。

福特汽车的大批量生产模式标志着第二次工业革命。人们对个性化消费品的需求日益强烈，信息化技术的发展为满足这一需求提供了可能。适合个性化消费的制造技术和生产模式所引领的第三次工业革命呼之欲出。

采用网络平台，将个性化的、分散的众需集成，其设计任务可以通过众创来快速提供多样化的创意设计供消费者选择，而制造过程可以由分散的制造资源完成，甚至由消费者本人在家里制造。这样，就提供了一个富有创意产品的、与大批量制造设计周期相近的、满足个性化消费和较低制造成本的众需、众创、众包的个性化制造模式，从而充分发挥社会的创新资源和制造资源。随之而来的是由此引发的商业模式和人们生产、生活模式的极大变革。传统制造技术制造工艺复杂，工艺路径具有多种选择途径，制造装备的多样化及工艺准备的复杂性，使得加工任务无法实现全自动化计算机工艺编程（CAPP），难以支撑集散制造，而 3D 打印的数据、工艺的一致性，使之成为集散制造的不二选择。

然而，人人可用、普适性的 3D 设计软件仍有待开发，各行业网络化的设计制造云平台也有待构建。

3D 打印技术将强力推动第三次工业革命的到来。

3 3D 打印技术发展趋势

3.1 设计创新——基于 3D 打印工艺的再设计使产品和装备实现重大创新

在工程应用领域，3D 打印为人们带来的重大效益可能来自对各类产品和装备的再设计。过去的可制造性设

计是仅以等材或减材制造工艺为约束的结构，而增材制造工艺可使许多结构解除过去的可制造性约束，重新考虑现有产品和装备结构，按照功能最优化设计。

结构再设计的突出优势有热交换结构再设计、轻量化结构再设计和结构一体化结构再设计等。例如，通用电气公司（GE）开发的飞机发动机喷嘴的燃油比减少了 15%[8]；加拿大学生设计的微型跑车百公里耗油 1.17 L [9]；空客公司的概念飞机可减重 60%[10] 等。针对应用于 IT 产品、航天航空发动机、空调乃至核电等领域的热交换构件的再设计可以产生重大效益。

各行业、各学科均将加入此创新行列，高技术的制造业物联网将促进制造业的全社会化创新。

3.2 工艺创新——3D 打印从控形走向控形控性

最初，3D 打印更注重零件的形状控制。随着金属材料打印研究的不断深入，人们开始关注工艺过程中的性能控制，如高非平衡态下形成的金相组织结构和制件的内应力分布等。加强工艺研究，控制激光束的能量与扫描工艺，以控制制件金相组织的形成，使控形与控性同时实现，3D 打印正在由快速成形走向控形控性制造。3D 打印逐点瞬态热历程及其历史效应有待深入研究，以实现控形控性制造，为高精度、优质表面的高效率制造寻求优化工艺。同时，3D 打印也是智能增材制造装备的基础。

3D 打印可以把材料打印到最能发挥其优势的地方。自然界造物充满了奥秘与神奇，竹子和动物骨就是典型的轻质、高强结构。有了 3D 打印，人们可以在各种产品上再现自然界的神奇，可以采用轻质高强材料，将内部设计成真空和蜂窝夹层结构，以获得最高的比强度和比刚度，然后在产品的表面打印抗腐蚀和磨损的材料，用 3D 打印技术把产品和装备制造成功能梯度材料结构，用最少的材料获得最优的性能。3D 打印正在从单一材料的增材制造走向多材料增材制造。功能梯度结构设计及结构的优化设计将为产品和装备创新带来巨大空间，必然引起各行业的高度关注并成为研究热点。例如，研究人员采用多材料 3D 打印技术实现具有负泊松比超材料结构的设计与制造 [11]。

3.3 工艺创新——3D 打印从宏观结构走向微纳结构

面向微纳制造的微纳 3D 打印工艺也开始展现灿烂的应用前景。3D 打印是小批量多品种传感器的有效制造途径，远比现有的微电子制造工艺机动灵活。3D 打印制造的微电机系统（MEMS）传感器，将在支持传感器网络制造与离散系统智能制造方面发挥重要作用。清华大学

钟敏霖教授利用超快激光扫描特定材料基板诱导生长石墨烯，通过设计扫描路径可实现石墨烯的可控图形化，利用此方法可以制造出温度、振动、压力等各类性能优异的传感器 [12]。微纳科技的自下而上的生长法制造与 3D 打印的增材制造在概念上是吻合的。

目前，研究人员在电子器件 3D 打印方面的研究也取得了突破性进展，采用类似喷墨打印或气凝胶打印技术实现复杂电路的打印，从最初的二维单层电路的制造，逐步发展到了多层复杂电子器件的 3D 打印快速制造 [13]。

3.4 工艺融合——增材制造与传统制造工艺的融合

工业界将把增材制造与等材、减材制造等传统工艺复合，集成为一台设备；或形成上下游复合工艺，如采用 3D 打印实现原型的快速制造，然后再复制成模具、电极、铸型等方法；或以简单模具辅助增材制造过程等。3D 打印与传统技术的优势互补将发挥更大效益。

3.5 材料创新——3D 打印将带来重大的科技创新

3D 打印令人鼓舞的发展方向之一是其可以成为发现新合金材料的科研平台。由于 3D 打印的能量非常集中，可在很小的区域产生极高的温度，而周围仍然保持常温状态，这种强非平衡态冶金过程将为在高温环境下研发各种优异性能合金提供一个创新的平台。美国国家航空航天局（NASA）制造的耐温 3315 °C 的火箭发动机零件 [14] 和王华民教授打印出的耐磨性提高 700 多倍的改性表面都是有益的探索 [15]。3D 打印将成为系列高性能合金的催生温床。人们有条件按照材料基因组的理论来设计新材料，利用 3D 打印的设备研发出超高强度、超高耐温、超高韧性、超抗蚀耐磨损的合金材料。

目前，3D 打印正在由 3D 发展到 4D，乃至生命体的制造。4D 打印是利用智能材料使打印的结构随环境（温度、压力、电磁场等）的变化而变化，以便实现现有技术难以实现的装配工艺，也可用于简化 3D 打印工艺及装备，如只需完成二维图形的打印，改变工作环境后，即可得到三维结构。

3D 打印研究人员正在开展利用生物活性材料打印生物组织支架的研究，利用附着其上的活性细胞的生长，使支架材料在生物体内降解，生长出生物体自己的组织细胞，这项技术正在进行医学验证，将很快投入医学应用。组织支架制造及细胞打印正在成为人体器官再创新的主要途径。如果说智能材料的使用使 3D 打印制件的形状可以随物理环境（温度、磁场）变化而变化，因此称之为 4D 打印，那么，组织支架及细胞打印结构就能在生化环境下生长成为生命体，进一步发生形状和功能的变化，

从而实现生命体的打印制造。3D 打印营造的生物化学环境对干细胞的定向转化具有重要意义，将推进生物器官再创研究的进展。

细胞打印也正在成为生命在空间环境下生长发育的研究手段。随着进一步发展，以基因为原材料进行细胞 3D 打印将成为转基因研究和生命学科发展的利器。当然，该技术将面临伦理方面的争议和权衡。

3.6 智能装备——3D 打印装备走向智能化

目前，人们对 3D 打印的适用材料范围、打印产品的质量有更多的期待。如金属材料打印，目前的打印速度仅为每小时若干千克，打印速度与制件的质量（形状精度、粗糙度及组织结构、内应力等）存在矛盾。因此需要研究人员更多的研究和创新，以便更快、更好、更廉价地完成制造任务，创造更大的价值。这里需要研究人员加强工艺研究，把控形控性研究的优化工艺固化在软件中，形成智能控制，使 3D 打印设备走向智能化。

3D 打印对装备的维修再制造和现场维修制造技术能够大幅度降低运输成本，成为装备安全运行的保障手段。3D 打印是实现节约型制造的最佳途径。

4 3D 打印将从技术概念上的三足鼎立走向价值分享的三分天下

将 3D 打印与传统制造进行价值对比，总是会引出许多质疑。这些质疑往往将 3D 打印完成同样一个既定零件的制造任务的周期和价格与传统制造工艺进行比较，而这种比较通常是不科学的。其一，各类制造技术各有优势和劣势，正如不能简单在等材制造（铸、锻、焊等）与减材制造（车、铣、磨等）之间相比较一样，各类制造技术应该用在能发挥各自优势的场合，如模锻用于大批量制造，切削加工适用于较小批量和更高精度的制造，而 3D 打印更适合单件的试制，以及复杂零件的快速响应制造，这些制造任务采用减材和等材制造工艺通常是难以完成的。这一特点使增材制造更多地应用于产品和装备的快速开发过程，可以大幅度节约时间和成本，实现巨大的效益。其二，3D 打印与等材、减材制造技术融合，将为先进制造技术赢得更大的效益。它们可以结合在一台设备上，实现复杂形状制造与高精度成形的集成，如德玛吉公司发展的一款 3D 打印装备将激光熔覆与高速铣削工艺相结合 [16]；也可以利用 3D 打印的原型，加以后续的复形工艺（电铸、硅胶模具、喷涂模具等）制造快速模具，实现快速响应制造。其三，我们不能按照现有的设计方案来比较和衡量，因为现有的设计方案是

基于等材和减材制造工艺设计的。一个突出的案例是 GE 用 3D 打印技术将飞机发动机喷嘴所需的 20 个零件直接集成为一个，省去了很多高精度配合的结合面加工，大大节约了制造费用和周期 [17]。如果仍按传统的设计和制造方案，采用 3D 打印工艺来制造这 20 个零件，可能费用就会大幅度增加，甚至无法达到配合面的精度要求。如果按照增材制造的工艺特点进行设计和 3D 打印制造，那么在制造成本和周期方面就会获得巨大效益。其四，基于 3D 打印工艺的产品和装备的再设计将形成创新的产品和装备，这一创新将带来比制造大得多的效益。因此，可能在很长的一段时期，3D 打印适宜承担的制造任务数量仍然赶不上等材和减材制造，但 3D 打印的结构、零部件、产品和装备均处于价值链的高端，数量与价值形成两个倒三角。因此可以预见，随着增材制造新技术的研发、产业化及应用推广，增材制造（3D 打印）将从与减材、等材制造所形成的技术概念上的三足鼎立，逐步走向应用领域及应用价值的三分天下。

Compliance with ethics guidelines

Bingheng Lu, Dichen Li, Xiaoyong Tian declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

1. T. Wohlers. *Wohlers Report 2013: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report*. America: Wohlers Associates, Inc., 2013
2. Y. M. Xie. Designing orthotropic materials for negative or zero compressibility. *Int. J. Solids Struct.*, 2014, 51(23-24): 4038–4051
3. A. Sutradhar, J. Park, D. Carrau, M. J. Miller. Experimental validation of 3D printed patient-specific implants using digital image correlation and finite element analysis. *Comput. Biol. Med.*, 2014, 52: 8–17
4. R. P. Hoyt. SpiderFab: An architecture for self-fabricating space systems. In: *AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition*, 2014: 1–17
5. K. Short, D. Van Buren. *Printable spacecraft: Flexible electronic platforms for NASA missions*. Pasadena, California: California Institute of Technology, 2012
6. G. Cesaretti, E. Dini, X. De Kestelier, V. Colla, L. Pambaguian. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronaut.*, 2014, 93: 430–450
7. General Electric Company. *Advanced manufacturing is reinventing the way we work*, 2014. <http://www.ge.com/stories/advanced-manufacturing>
8. K. Bullis. A more efficient jet engine is made from lighter parts, some 3-D Printed. *MIT Technology Review*, 2013-05-14
9. J. Bargmann. Urbee 2, the 3D-printed car that will drive across the country, 2013. <http://www.popularmechanics.com/>
10. P. Olson. Airbus explores building planes with Giant 3D Printers. *Forbes*, 2012-07-11
11. K. Wang, Y. H. Chang, Y. W. Chen, C. Zhang, B. Wang. Designable dual-material auxetic metamaterials using three-dimensional printing. *Mater. Design*, 2015, 67: 159–164
12. X. Ye, J. Long, Z. Lin, H. Zhang, H. Zhu, M. Zhong. Direct laser fabrication of large-area and patterned graphene at room temperature. *Carbon*, 2014, 68: 784–790
13. D. Zhao, T. Liu, M. Zhang, R. Liang, B. Wang. Fabrication and characterization of aerosol-jet printed strain sensors for multifunctional composite structures. *Smart Mater. Struct.*, 2012, 21(11): 115008
14. L. Kratochwill. NASA tests largest 3-D printed rocket part ever: 3-D printed engines could support human missions to deep space. *Popular Science*, 2013-08-29
15. H. Wang, L. Zhang, A. Li, L. Cai, H. Tang. Rapid solidification laser processing and forming of advanced aeronautical metallic materials. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(10): 962–967
16. DMG MORI. LASER TEC 65 3D. 2014-11-13. <http://www.3d.dmgmori.com>
17. Alec. GE 3D prints and test fires a fully functional miniature jet engine. 2014-11-12. <http://www.3ders.org/articles/20141112-ge-3d-prints-and-test-fires-a-fully-functional-miniature-jet-engine.html>