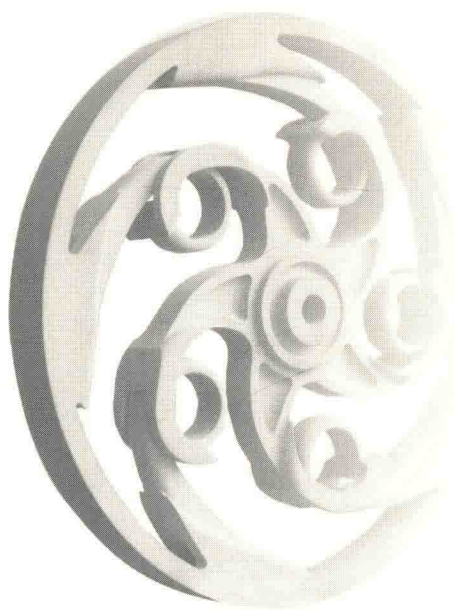




3D
打印
工业
级
应用
圣
经

3D 打印 工业 制造 与

工业和信息化部工业文化发展中心

组 编

王 晓 燕 朱 琳

编 著

3D 打印与工业制造

工业和信息化部工业文化发展中心 组编

王晓燕 朱 琳 编著

机械工业出版社

3D 打印是一种深刻颠覆传统规则的制造技术。本书揭开了 3D 打印关于价值创造的奥秘,从制造的角度介绍了 3D 打印的价值与发展趋势。通过独一无二的业界视角、趋势跟踪与数据分析,本书不仅可帮助读者建立对 3D 打印发展的全局感,而且还通过深度剖析与行业透视带给业界一种思考的逻辑。这种全局感和思考的逻辑是弥足珍贵的,将带领企业和个人找到价值创造方向,重塑核心竞争力。

本书适合从事与 3D 打印相关行业的人员阅读,更适合那些希望对 3D 打印有全局认识的人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

3D 打印与工业制造/王晓燕,朱琳编著. —北京:机械工业出版社,2019.1

ISBN 978-7-111-61729-7

I. ①3… II. ①王… ②朱… III. ①立体印刷-印刷术 IV. ①TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 000577 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:陈保华 申永刚 责任编辑:臧弋心 王春雨

责任校对:王 欣 封面设计:马精明

责任印制:张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·17.5 印张·336 千字

0 001—5 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-61729-7

定价:69.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

序

Introduction

探索 3D 打印价值的 “wow”

增材制造是一种改变游戏规则制造技术，而出版《3D 打印与工业制造》大致有两个主要目的，一是提供一种值得信任的思考逻辑。由于信息传播的便利性，使得我们生活在一个信息过于繁杂和浮躁的时代，这使得静心观察与深刻思考变得弥足珍贵。在日常的工作中，我们时常会清晰地感受到迷茫，也会体会到可信度高的资讯并不多，很多企业犹如在沙漠中行走，疲惫得甚至无法分辨出是否有危险来临，也很难看清机遇的到来。我们希望通过密切跟踪应用端的进展，提取出值得借鉴的观点，能够对这些企业的思考逻辑有所帮助。二是提供一种全局观。为什么全局观这么重要？拿金属粉末床熔融技术来说，这项技术的下一步是高度的智能化，通过感应器捕捉的数据，结合前馈控制、仿真模拟计算技术，从而实现对质量的稳定性和一致性的控制。也就是说关于这项技术，软实力将变得远远比硬件更重要。那么对于企业来说，建立这样的全局观可以避免无效的研发投资。对于大学生来说通过此书建立对 3D 打印的全局观也是很重要的，比如说你是一个计算机或者数学系的毕业生，你会发现，你的专业和 3D 打印看似不相关，实际上却是紧密相关的。

大道至简，懂得尊重 3D 打印的技术特点，就会寻找到适合 3D 打印发挥长处的价值创造之路。而 3D 打印从业者在日常所遇到的困惑或者所走过的弯路，基本都与不尊重 3D 打印的技术属性和不懂得挖掘 3D 打印的价值所在有关。

关于 3D 打印对于制造业的价值，则仁者见仁智者见智，在我们看来，只有把 3D 打印所制造的产品价值从产品生命周期和产业链的角度去理解，才能真正把握其中的奥秘所在。

3D 打印的突出特点有两个：一是免除模具，二是制造成本对设计的复杂性不敏感。免除模具的特点使得 3D 打印适合用于产品原型、试制零件、备品备件、个性化定制、零件修复、医疗植入物、医疗导板、牙科产品、耳机等小批量个性化的产品。而传统制造工艺，如果产品的设计过于复杂，那么对应的制造成本就会十分昂贵。3D 打印对所占用的材料成本更加敏感，而对设计的复杂性并不敏感，也就是说 3D 打印适合制造复杂形状的产品，包括一体化结构、仿生学设计、异形结构、轻量化点阵结构、薄壁结构、梯度合金、复合材料、超材料等。

摄影师 Platon Antoniou 曾在为霍金拍摄时问了霍金一个问题：“您能不能给我

一个词，谈谈您想对这个世界说什么？”霍金打出了他对这个世界想说的话：“wow”！即使一生被禁锢在轮椅上，他依然觉得这个世界值得人惊叹与热爱。

提到霍金，是因为我们在关注 3D 打印所能为人类所创造的价值过程中，我们的心得正好是：“wow”。

当前，3D 打印要么被忽略要么被过分地夸大，希望人们能够通过《3D 打印与工业制造》来客观、清晰地了解关于 3D 打印的“wow”。不管你是哪个行业，不管你是什么专业，只要与制造有关，你会发现，你都离不开 3D 打印。而拥有这种洞察力，你将能做到心中有数。

无论你是学校里的学生，无论你是否在学习 3D 打印相关的知识，无论你是制造业的管理层还是技术人员，无论你的企业是否已经使用了 3D 打印技术。本书都将为你揭开 3D 打印关于价值创造的奥秘，你将从中受益。希望我们的读者能从应用的角度上理解 3D 打印的价值，不仅对 3D 打印的发展建立全局感，还能敏锐地捕捉到 3D 打印与应用端结合的落脚点。然后有针对性地去补充自己需要的知识，包括材料、机械、软件、检测、后处理、激光加工等。

如果，从现在开始预测关于 3D 打印下一个十年的发展，我们希望能看到在技术和应用层面上发生的变化：3D 打印与机器人成为生产线的一部分，与其他相关技术与装备协调配合，从而不断地制造不同的产品，包括塑料产品、金属零件以及复合材料产品。我们相信为了迎接这一天的到来，从业者需要更好的全局观与思考逻辑，这就是本书的价值所在。

感谢 3D 打印业界和应用端与我们多年的沟通，相信这本书将以其与众不同的视角带给业界一个“wow”。希望这本书成为 3D 打印行业的必读圣经！帮助业界去开拓 3D 打印更多值得人惊叹与热爱的“wow”，这将是属于我们共同的旅程。

3D 科学谷 王晓燕 朱琳

前 言

Foreword

为什么要写这本书

本书作者来自于传统制造业，从传统制造的视角来理解和解读 3D 打印的潜力与发展趋势具有很大的优势，因为你必须了解制造，才能通过紧密追踪 3D 打印的发展获得一种“恍然大悟”的感觉，你需要多年植根于制造业，才能理解 3D 打印究竟对于制造业将要带来怎样的第四次工业革命。

我们相信，这种“恍然大悟”的心得不仅仅存在于我们心中，更存在于类似于 GE、欧瑞康、GKN 这些企业。面对 3D 打印，这些企业不仅仅在战略上进行了全盘布局，还感到了一种前所未有的压力和危机感，因为他们本身的大部分业务都扎根于传统制造方式，而他们越来越清晰地看到，以 3D 打印为代表的增材制造技术将要对他们原有业务本身的转型带来相当大的财务压力。面对 3D 打印，如果你感受到的是一种莫名的焦虑感和迫切感，那么这种感觉是正常的；面对 3D 打印，如果你感到这种技术令人失望，不仅贵还很慢，工艺也很难控制，那么你缺乏对 3D 打印本质的认识。

除了一种“恍然大悟”的分享驱动，出版本书还源于一种使命感。笔者曾经从业于德国的传统机加工行业，深知德国的工匠精神是如何深入到基因中的一种难以替代的竞争力，也曾经深入了解日本人如何用手工的方式来加工机床的床身部件，这些优势都会在 3D 打印的发展中体现出来。我国若要在 3D 打印领域取得突破，一定不能忽视基础，一定要正视现实，补齐短板，可谓任重而道远。

除了民族的使命感，还有一种对我们赖以生存的地球的责任感，正如 Christopher Barnatt 在他的《3D 打印，正在到来的工业革命》一书中所提到的“3D 打印最终和最重要的潜在益处是对环境的改变。现在，大量的燃油和其他资源在世界范围内被用来运送产品，许多东西都经过数百或数千英里来到我们的手中。考虑到自然资源供应的压力越来越大，这样大量的运输变得不可行，在文化角度上也会变得无法接受。因此，本地制造的需求就会成为 3D 打印的长期趋势。”

此外，不得不说，我们所处的世界，过于喧嚣和浮躁。市场上既不懂制造，又没真实地了解过 3D 打印技术，也没有跑过应用端的“3D 打印专家”比比皆是。一些所谓的咨询和分析机构，仅凭着股价走势，就对国家政策导向以及 3D 打印行业的发展进行各种不负责任的评论。这些谬论与误导以一种伪科学的方式出现，甚至会影响到传统制造业探索 3D 打印价值的心态，这是有害的。

工业和信息化部工业文化发展中心组织接受了我们的邀请并同意作为组编，针对 3D 打印普遍存在的误区，基于成功出版经验，着力于还原 3D 打印真实潜力与发展前景，并与市场上现有的 3D 打印类书籍有极大的差异化，《3D 打印与工业制造》这本书的着力点在于对 3D 打印的价值与潜力的深刻剖析。此外，与时俱进，根据 3D 打印的发展情况，《3D 打印与工业制造》计划每两年更新再版一次。

本书特色

从章节安排来说，笔者曾走访过一些技术上处于制造业前沿的国内制造企业，但无一例外，这些企业的制造专家首先想到的是他们手上的产品通过 3D 打印来制造的话需要多长时间，精度达到什么水平，能否达到锻造的性能，成本是多少……，很多人从来没有想过，3D 打印的最大优势是用于制造极其复杂的产品，也就是说通过 3D 打印来完成制造，你的产品与现在产品相比将产生本质上的飞跃。

3D 打印要释放潜力，突破传统制造思维的限制是最重要的。本书从解释为增材制造而设计的思维开始，抽丝剥茧，通过制造业关心的出发点来解读突破思维限制的方法与轨迹。随后，通过第二大部分的市场篇将 3D 打印的宏观层面与微观层面的发展进行逐一剖析，呈现出能够捕捉和感知 3D 打印发展趋势的全景图。最后，通过每个具有产业化机会的细分市场及应用的介绍，结合 3D 打印技术“家族”下不同类别的打印技术，将产业发展方向进行逐一清晰的展开与透视。

读者对象

- 1) 希望为数字化制造进行布局的企业。
- 2) 希望了解 3D 打印并准备就业的大学生与职校学生。
- 3) 对 3D 打印感兴趣的从业人员和爱好者。

如何阅读此书

第一部分实践篇包括突破思维局限、增材制造的国际标准、成功 3D 打印零件的要素等内容。实践篇不仅剖析了 3D 打印所需要具备的知识是需要跨界的，而且思维意识也需要突破传统的制约。

第二部分市场篇包括 3D 打印发展的宏观层面、微观层面、战略布局、数字化趋势、各国支持、科研机构、教育等内容。市场篇揭示了 3D 打印充满了无限的可能，也布满了暗礁，不管是政府支持层面，还是企业经营层面，抑或是大学生学习，建立对 3D 打印发展的全局观可以避免很多浪费与弯路。

第三部分应用篇包括航空航天、汽车、模具、铸造、液压、工业其他、医疗、电子、首饰等内容。应用篇的细分章节中重点剖析了 3D 打印将要带给每个细分应用领域变化，以及 3D 打印在这些领域的发展趋势与前景。

勘误与支持

3D 科学谷力求内容的严谨性，但限于时间和人力因素，书中难免有不足之处，如存在失误、失实，敬请不吝赐教、指正。请通过 3D 科学谷官方网站 www.51shape.com，或官方微信 www_51shape_com 发表评论，或者直接发送邮件至邮箱 editor@51shape.com 联系我们，让我们在技术之路上共勉共进。

致 谢

感谢工业和信息化部工业文化发展中心的支持。

感谢中国 3D 打印文化博物馆对此书出版与发行的支持。

感谢安世亚太科技股份有限公司对本书的支持。

感谢 3D 科学谷德国同事 Mrs. Korinna Penndorf 在先进的 3D 打印技术方面所做的沟通工作。

最后，特别感谢支持 3D 科学谷（3D Science Valley）的朋友，你们的热爱与支持，让我们在追求目标的过程中更加富有力量，并且坚信 3D 打印一定会在中国的土壤中成长壮大。

3D 科学谷 王晓燕

目 录

Table of Contents

序 前言

第一部分 实 践 篇

第一章 突破思维局限	2
第一节 突破传统制造思维的限制	3
第二节 为增材制造而设计的规则	6
第三节 重塑产品	13
第四节 数据赋能增材制造生产	17
第五节 仿真提升过程可控性	19
第六节 实现轻量化的四种途径	20
第七节 创成式设计	23
第八节 小点阵大作用	24
第九节 多材料 3D 打印	27
第十节 超材料与 3D 打印	29
第二章 增材制造的国际标准	31
第一节 ASTM 国际标准概述	31
第二节 金属增材制造的现状与 ASTM 国际标准	32
第三章 成功 3D 打印零件的要素	45
第一节 金属 3D 打印质量控制的三种方法	45
第二节 安全生产	53
第三节 后处理对增材制造的影响	55

第二部分 市 场 篇

第四章 3D 打印的发展：宏观层面	60
第一节 3D 打印进入生产	61

第二节 迎接商业模式的重构	63
第三节 国内当前三大“接地气”的机会	66
第五章 3D 打印的发展：微观层面	71
第一节 金属 3D 打印和冶金加工学	72
第二节 多样化的金属 3D 打印技术	73
第三节 走向生产的塑料 3D 打印	80
第六章 3D 打印领导企业的战略布局	90
第一节 向 3D 打印发力的巨无霸们	90
第二节 材料巨头加快增材制造步伐	98
第三节 航空航天企业的多重布局	101
第七章 3D 打印与数字化制造趋势	107
第一节 3D 打印 + 数字化生产模式	108
第二节 与大数据“手牵手”	111
第八章 各国政府的支持及科研机构	115
第一节 各国政府的支持	115
第二节 硕果累累的两大科研机构	121
第九章 教育	125
第一节 为 K12 教育服务的生态圈	126
第二节 多学科交叉的高等教育	128

第三部分 应 用 篇

第十章 航空航天	132
第一节 3D 打印成为核心制造技术	133
第二节 催生下一代航空制造	134
第三节 重新定义航空关键零件	138
第四节 机身与内饰走向经济性与个性化	144
第五节 航天制造新赛道	145
第十一章 汽车	155
第一节 快速原型制造	156
第二节 概念车	157
第三节 汽车零部件创新	159
第四节 定制化夹具制造	166
第五节 电动汽车时代为 3D 打印带来的机遇	167
第六节 切入定制化市场	174
第十二章 模具	176

第一节	3D 打印模具的“废”与“立”	177
第二节	注塑模具与随形冷却水路	178
第三节	更多的随形冷却	182
第四节	轮胎制造的新思路	183
第五节	快速模具的“快”意	184
第十三章	铸造	186
第一节	砂型铸造	188
第二节	熔模铸造	192
第十四章	液压	195
第一节	液压市场不平凡	195
第二节	液压歧管的“瘦身”故事	197
第三节	机械中不寻常的液压系统	199
第四节	“复杂性”驱动液压增材制造	200
第五节	液压制造商发力 3D 打印	202
第十五章	工业其他	204
第一节	燃气轮机制造	204
第二节	核工业	208
第三节	刀具	209
第四节	后市场	211
第五节	再制造	214
第十六章	医疗	218
第一节	手术预规划	219
第二节	植入物	221
第三节	牙科	232
第四节	康复医疗器械	240
第五节	芯片上的实验室	246
第十七章	电子	249
第一节	印刷电子与硅基微电子	249
第二节	PCB 快速原型	251
第三节	小批量制造	252
第四节	几种有生产潜力的应用	253
第五节	3D 打印与物联网	256
第十八章	首饰	257
第一节	首饰的两种“打印”方式	258
第二节	互联网 + 首饰定制	261
附录	技术名词	265
参考文献		268

第一部分 实 践 篇

第一章 突破思维局限

很多人怀疑3D打印潜力的一大依据是这一技术并不新鲜，而是30多年前就存在了，如果3D打印真的潜力巨大，为什么这么多年一直没有成为一种主流的制造技术？其实，除了成本、精度、效率等因素，制约3D打印发挥潜力的一个重要因素说出来可能会让很多人感到吃惊，那就是思维的限制。是我们自己的思维方式限制了这项应用的发展，这听起来似乎不可思议或者难以接受。

理解3D打印技术的特殊性，是突破思维限制，“玩转”这项技术的关键。

3D打印的特殊性在于它既是一种将产品设计转变为实体的制造技术，又是一种改变人们生产、生活方式的途径。如果单纯将3D打印看成是一种制造技术，那么就难免会将它与目前成熟的制造加工技术相比，显然，3D打印在成本、精度、效率等多方面都还不能与传统技术相比。从这个角度上来看，很多人认为3D打印并不“酷”，他们对3D打印技术的态度是拒绝的。

而另一种看待3D打印的角度就截然不同了，持这种态度的人或企业将3D打印技术看成是重塑产品，颠覆传统供应链和传统商业模式的一种途径。从这个角度上来看，3D打印技术的潜力不言而喻。

关于3D打印在产品重塑方面的潜力，一个典型的应用是3D打印助力西门子三款燃气轮机实现超过63%的联合循环效率。3D打印用于制造燃烧系统零部件，零部件是经过设计优化的，3D打印实现了更复杂的产品几何形状，使燃气轮机中的燃料和空气预混合得到改进，从而实现最高的发电效率。要知道从2000年到2010年期间，西门子花了10年时间才将联合循环电厂的发电效率从58%提升到60%，可见3D打印燃烧系统零部件对于提高发电效率所发挥的作用是显著的。从这个应用中可以看出，3D打印对产品的重塑，不仅包括其外观，还包括性能的提升。

关于3D打印对未来生产、生活方式的改变，制造业巨头GE（通用电气公司）曾经描述了一个有趣的场景：2030年的春季，一个人坐着自动驾驶汽车，行驶在上班的路上。在途中，汽车自动检测到一个零件需要在一周内更换，这个信息被汽车中的物联网设施传递给车主，车主通过应用了区块链技术的分布式制造网络，将零件定制需求发送给汽车售后服务店，于是汽车配件就可在售后服务店中进行定制化生产。当汽车到店更换零件时，零件已制造完毕，车主更换好零

件继续上路。

在这个场景中，GE 突出的是包括 3D 打印技术在内的数字化技术对制造模式和生活的改变。传统方式下，汽车零件在工厂中大规模批量生产，制造后通过分销渠道进入到各维修店准备出售。而车主也无法预知零件更换需求，通常是在汽车出现问题之后，才前往售后服务点进行检修，然后更换上库存中的零件。

而在 GE 描述的场景中，这样的模式被改变了，汽车配件是按需生产的，生产地点也不是汽车零部件批量化生产的工厂，而是分布在社区周边的汽车售后服务点。这说明汽车零件的供应链被压缩了，并且 3D 打印带来的个性化生产模式，使生产离消费者很近。越来越多的老牌工业制造企业或品牌在产品生产过程中引入增材制造工艺，也正是看重了 3D 打印在产品重塑、供应链重塑以及商业模式改变等方面所具有的潜力。

那么，是不是说任何企业只要购买了 3D 打印设备，有朝一日就能够在企业所处的领域实现 GE 所描述的那种场景了呢？答案当然是否定的，无论是从技术本身，还是从产业链层面上来看，仅凭 3D 打印设备想要实现这一场景并不现实。

从技术本身来看，3D 打印技术所涉及的并非仅包括那些以逐层叠加的方式进行材料成型的设备，还涵盖了仿真技术、优化设计、监测 3D 打印过程质量控制技术，以及配套的后处理工艺。从产业链上来看，如果要像 GE 设想的未来汽车售后服务店那样实现零件或产品的分布式制造，消费者（或者是带有传感器的零部件）、3D 打印和相关后处理设备、分布式制造中心都需要并入网络，通过互联网、物联网、区块链等技术来管理制造需求和制造过程。

无论从哪个方面来看，3D 打印都不是一座“孤岛”，而是集成在一起的一系列硬件、软件技术系统。

如果你也看到了 3D 打印技术的潜力，那么就从突破传统制造思维的限制，打磨增材制造思维开始前行吧。

第一节 突破传统制造思维的限制

3D 打印/增材制造技术正在加速发展，并成为一种强大的生产技术，但在工业制造中应用该技术的一大障碍是，目前绝大多数的工业设计师所熟悉的制造技术是减材或等材制造技术，他们了解传统制造技术所要求的设计规则，在设计时会根据这些制造技术的特点来调整设计方案，然而对于增材制造技术的特点知之甚少。突破传统制造思维的限制成为增材制造是否能发挥潜力的一大挑战。

多年来形成的规则已经占据了设计师的大脑，这就意味着，当设计师们在设计一件 3D 打印零件或产品的时候，需要打破以往头脑中所熟知的设计规则，遵

循一种满足增材制造技术特点和工艺要求的全新设计思路——为增材制造而设计 (DfAM)。

“为增材制造而设计”最常见的定义是：基于增材制造技术的能力，通过形状、尺寸、层级结构和材料组成的系统综合设计最大限度提高产品性能的方法。为增材制造而设计不仅仅是一种设计方法，更是一种策略。在工作中设计工程师会遇到很多挑战，包括如何获得最优的结构形状，如何将最优的结构形状与最优的产品性能相结合，并在设计时将 3D 打印零件的后处理等工艺对设计的影响考虑进来。

为增材制造而设计离工业制造并不遥远，比如说我国的航天制造企业中国航天科技集团五院总体部针对其 3D 打印零件进行了点阵结构胞元性能的研究，结合三维点阵在航天器结构中应用的实际情况，提出了三维点阵结构胞元的表达规范，这些研究遵循典型的增材制造设计思路。

可以说，“为增材制造而设计”这一理念的倡导和执行层面的系统建设是当前 3D 打印向应用端深化的重心和必经之路。

1. 理解加工过程

在金属机械加工过程中，加工刀具可以由人工来进行选择，从而制造出特定的细节特征，刀具的大小决定了零件的孔和槽的最小尺寸。在注塑加工过程中，注塑模具的形状决定了产品的形状。

而增材制造过程中发生的各种变化，比机械加工过程要复杂得多。为什么这么说呢？以基于粉末床工艺的选区激光熔融 (SLM) 3D 打印技术为例，金属粉末材料被激光扫描和加热，每个激光点创建了一个微型熔池，金属粉末将经历一个从熔融到冷却凝固的过程。在此过程中，影响零件细节特征的不是刀具，而是激光光斑尺寸和激光器的功率。激光光斑的尺寸以及激光所带来的热量的大小决定了微型熔池的大小，从而影响着零件的微晶结构。

在激光熔融粉末时，必须有充足的激光能量被转移到材料中，将中心区的粉末熔融，从而创建完全致密的结构，但同时热量也会传导超出激光光斑范围，影响到周围的粉末。所以，通常金属 3D 打印零件的最小的制造尺寸需大于激光斑，超出激光点的烧结量，根据粉末的热导率和激光能量来确定。例如， $140\mu\text{m}$ 的点阵结构可使用 $70\mu\text{m}$ 的激光点来制造，对应壁厚可达到 $200\mu\text{m}$ 。

当然，金属 3D 打印技术包括很多，这里我们介绍的仅仅是其中一种：粉末床激光熔融技术，金属 3D 打印还有很多其他技术，这里不一一分析举例。

而关于塑料 3D 打印，材料的发展对其应用起到十分关键的作用，工艺方面则因为立体光固化 (Stereolithography Apparatus, SLA)、熔融沉积成型 (Fused Deposition Modeling, FDM) 等技术的快速发展而不断走向更加细致的分支。美国 Carbon、惠普 (HP)、Stratasys 等公司所推出的多样化的 3D 打印设备，将塑

料3D打印技术推向可以与注塑工艺竞争的水平，无论是从塑料件的性能，还是从尺寸和几何精度的角度来看，塑料3D打印已不再局限于原型制造，而是进入到产品生产制造层面。

2. 支撑结构

3D打印技术是一种材料逐层成型，不需要使用模具的制造技术，这为产品的设计带来更大的空间。但是，多数3D打印工艺在制造零件的过程中需要支撑结构，它们将对3D打印产品的设计方式产生影响，并影响整体的制造效率和成本。

比如说在选区激光熔融3D打印技术中，支撑结构起到的作用一是加强和支持零件与构建平台的稳定性；二是带走零件构建过程中多余的热量；三是防止零件翘曲以及降低零件构建过程中的失败概率。在这种工艺中，去除支撑结构的成本在后期处理中可能占总成本的70%，如果要提高增材制造的效率、降低成本，就有必要考虑如何在进行零件设计时最大限度地减少支撑结构的使用。

3. 表面质量

不同的3D打印技术带来不同的表面质量，这里面，金属3D打印与塑料3D打印的表面质量处于不同的市场接受度水平。随着加工技术和材料技术的发展，塑料3D打印中的光固化技术以及熔融沉积成型技术，使得用这种技术生产的产品表面质量越来越接近注塑件的质量。

而金属3D打印目前还没有达到令人满意的水平。

以常用的选区激光熔融技术为例，在制造过程中，设备的激光束将对金属粉末进行加热，使其熔融，随后经过激光熔融的区域温度下降。在热传导的作用下，微型熔池周围出现软化但没有液化的粉粒。这些粉粒有的被熔融金属吸附，成为牢固地附着在组件表面的颗粒。其他距离热源远的粉末颗粒则未被熔融，仍留在粉末床上。

由于选区激光熔融设备在进行零件增材制造时是逐层铺粉的，在设备进行后一层的激光熔融处理时，将会有一些热量传导到前一层，从而将熔融不完全的颗粒又重新熔融。在这种渐进熔融和冷却的相互作用下，形成增材制造零件表面的特有纹理。

增材制造零件的表面粗糙度与激光功率大小、粉末粒度、层的厚度等因素相关。原则上，通过优化金属粉末和激光参数这样的方式能够改善金属零件的表面质量。但是，通过调节这些因素来提升表面质量与加工时间、加工成本之间存在着一定的关系，在进行调整的时候需要整体权衡。比如说层的厚度越小，表面质量越高，但同时所需要的加工时间会增加，加工成本也随之上升。3D打印金属零件的表面质量也与零件表面的建构方向有关。一般来说，顶面会更光滑。当零件与基板之间的角度变大时，表面会变得更加粗糙。

4. 考虑后处理

当前的 3D 打印零件确实存在着一些先天不足，但部分先天不足可以通过一些后处理工艺来后天补足。以目前在实际生产中应用较多的粉末床金属熔融 3D 打印技术来说，为了使金属 3D 打印零件达到所要求的力学性能以及表面质量，在打印完成后往往需要配合使用热等静压、热处理、机械加工、磨削等后处理工艺。

这些后处理工艺将对 3D 打印零件尺寸产生一定改变，所以在设计一个 3D 打印产品的初期就应该将需要使用的后处理工艺考虑进去，以便在设计中为后处理工艺留出余量，降低零件的废品率。当然，这些设计思路对增材制造设计师提出了挑战，唯有设计师对将要应用的 3D 打印工艺充分了解，才能够在设计初期全盘考虑 3D 打印和后处理对于设计的影响。

比如说，如果一个金属 3D 打印零件需要通过机械加工提高表面光洁程度，那么设计师在设计零件时就需要考虑材料的去除量，并在设计时补偿，如果在机械加工中需要去除 0.05cm 的厚度，在设计的时候就需要增加 0.05cm，以便后处理后零件符合要求的尺寸公差。当试图进行表面后处理时，设计师还必须考虑过程本身的物理特性，比如说零件棱角位置材料会更容易去除，所以在设计时需要在这些位置加大轮廓度公差。除了外部表面光洁，零件的内腔往往需要一定的畅通性，设计师应考虑这些材料的去除率和补偿。

在进行增材制造设计时，设计师需要考虑两种类型的 CAD 模型：一种是最终的几何形状，包括基准的确定、加工尺寸公差要求、表面粗糙度要求等；另一个同样重要的 CAD 模型是供 3D 打印设备识别加工的模型，这个模型中可补孔，可增加支撑结构，也可以增加加工余量。

通过不同的 3D 打印工艺加工出来的零件，后处理的思路也不尽相同，这些后处理工艺将反过来影响到设计方案。例如，如果用于制造零件的设备为基于粉末床工艺的电子束熔融（Electron Beam Melting, EBM）3D 打印设备，不需要考虑到金属零件与打印基板分离的问题，但需要考虑去除金属粉末和粉末清除处理对设计的影响。如果用于制造零件的设备为选区激光熔融 3D 打印设备，则需要考虑将零件与打印基板分离切割的问题和消除残余应力的问题。有关后处理工艺对设计所产生的影响以及相关的应对策略的细节将在后面的“后处理”章节中进行介绍。

第二节 为增材制造而设计的规则

GE 研发的飞机发动机 3D 打印燃油喷嘴，将粉末床金属熔融增材制造技术推到了 3D 打印家族的聚光灯下。然而，在现实操作中，这项技术颇具挑战性，