

# 金属增材制造技术轻量化应用研究进展

刘景博<sup>1</sup>, 刘世锋<sup>1,3</sup>, 杨鑫<sup>2,3</sup>, 李安<sup>1</sup>, 时明军<sup>1</sup>,  
张光曦<sup>1</sup>, 张智昶<sup>1</sup>, 韩松<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

(2. 西安理工大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710045)

(3. 西北有色金属研究院 金属多孔材料国家重点实验室, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 增材制造技术具有逐层立体快速制造、个性化制造、柔性生产等优势, 凭借其由计算机模型直接制造复杂工件的先进技术, 已在制造工业领域获得大量应用。介绍了增材制造在航空航天及汽车等领域的应用情况, 分析了增材制造在实际应用以及后期维修中较传统制造的优势。基于增材制造相对于传统制造的优势, 介绍了增材制造的技术、设备、粉末原材料在航空航天用材料的减重设计与制造、汽车行业中的拓扑优化与制造中的应用。最后阐述了增材制造在国内外的的发展状况和应用前景, 预测了增材制造技术在制造行业的应用将呈指数增长态势。

**关键词:** 增材制造; 航空航天; 汽车工业; 应用现状; 发展趋势

**中图分类号:** TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)02-0163-06

## Progress in Lightweight Application Research of Additive Manufacturing Technology

LIU Jingbo<sup>1</sup>, LIU Shifeng<sup>1,3</sup>, YANG Xin<sup>2,3</sup>, LI An<sup>1</sup>, SHI Mingjun<sup>1</sup>,  
ZHANG Guangxi<sup>1</sup>, ZHANG Zhichang<sup>1</sup>, HAN Song<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710045, China)

(3. State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** Additive manufacturing technology has the advantages of layer-by-layer rapid manufacturing, personalized manufacturing, flexible production, etc. With the advanced technology of directly manufacturing complex workpieces from computer models, it has been widely used in the manufacturing industry. The applications of additive manufacturing in aerospace and automotive fields are introduced. The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing in practical application and later maintenance are analyzed. Based on the advantages of additive manufacturing compared to traditional manufacturing, this paper introduces the applications of additive manufacturing technology, equipment and powder raw materials in weight reduction design and manufacturing of aerospace materials, and topology optimization and manufacturing in the automotive industry. Finally, the development status and application prospects of additive manufacturing at home and abroad are expounded, and the application of additive manufacturing technology in the manufacturing industry is predicted to increase exponentially.

**Key words:** additive manufacturing; aerospace; automotive industry; application status; development trend

## 1 前言

增材制造技术, 亦称 3D 打印技术, 是 20 世纪 80 年代发展起来的快速成型技术之一<sup>[1]</sup>。3D 打印技术采用离散堆积的印刷原理, 与喷墨打印机基本原理类似, 采用材料“自下而上”逐层堆积成所需几何形状的方式制造出实体零件<sup>[2]</sup>。航空航天用增材制造技术通常有 4 种: 激光选区熔化成形(SLM)、激光熔化沉积(LMD)、电子束

收稿日期: 2018-08-01 修回日期: 2018-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51671152, 51874225);  
陕西省教育厅产业化项目(18JC019)

第一作者: 刘景博, 男, 1993 年生, 硕士

通讯作者: 刘世锋, 男, 1978 年生, 教授, 硕士生导师,

Email: Liushifeng66@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201808002

选区熔化沉积(SEBM)、电子束熔丝成形(EBF)。增材制造可以通过结构设计达到材质轻量化的目的,主要方式有4种:一体化结构实现中空夹层结构、薄壁加筋结构、镂空点阵结构、拓扑优化结构。其中,拓扑优化<sup>[3]</sup>是根据给定的负载情况、约束条件和性能指标,在给定的区域内对材料内部分布进行优化的数学方法。增材制造颠覆了传统的制造理念,极具时间和成本效益。这种直接成型技术金属使用率高且环保,减少了材料的浪费;其逐层制造的优势使极其复杂的互锁零件无需组装便可投入使用;其产品研发周期短且利于减小库存;其易变和广阔的创新设计空间使个性化需求设计门槛变低。传统的锻造和减材制造技术不仅浪费原材料,而且产品的精度、质量和增材制造技术的有一定差距。目前,增材制造技术在全球工业范围内被大量应用,涌现出各式各样的设备及尖端技术。

所谓“一代装备,一代技术”,设备的先进程度直接决定了技术产品的优劣。针对 SLM 和 SEBM 两种金属增材制造常用技术,瑞典 Arcam 公司研发了 EBMArcamQ20 型 EBM 设备,其可成形以钛合金为基础的金属零件的尺寸为  $\Phi 350\text{ mm} \times 380\text{ mm}$ ,光斑的最小直径为  $180\text{ }\mu\text{m}$ ,电子枪峰值功率为  $3000\text{ W}$ ,最高扫描速度为  $8000\text{ m/s}$ ,Arcam 公司最新的设备 EBMArcamQ20plus 打印机整体效率提升了 15%。西安赛隆公司最新推出的 Sailong-S200 型 SEBM 设备,其外形尺寸为  $2100\text{ mm} \times 1200\text{ mm} \times 2300\text{ mm}$ ,最大成形尺寸为  $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ,电子束斑直径小于  $0.4\text{ mm}$ ,连续运行时间达  $40\text{ h}$ 。此外,清华大学机械工程系研发的 EBSM-250 型电子束选区熔化设备,其电子束斑直径为  $200\text{ }\mu\text{m}$ ,电子束功率为  $3.5\text{ kW}$ ,最大扫描速度为  $100\text{ m/s}$ ,粉层厚度为  $0.05 \sim 0.2\text{ mm}$ ,成形效率为  $10\text{ cm/h}$ ,具有  $80\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 80\text{ mm}$  和  $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  两种尺寸成形仓<sup>[4-9]</sup>。不同的打印设备应用的软件也不尽相同,但大多数的增材制造技术在制作悬臂、裙边等结构时需要添加工艺支撑结构,而由比利时 Materialise 公司推出的 Materialise Magics 21.0 软件,在经过 Cero 2.0 绘制草图后再进行支撑工艺的添加<sup>[10]</sup>是目前增材制造使用的主流方法。支撑是为了防止下层未成形粉层的坍塌,避免样品变形<sup>[11]</sup>。

本文从航空航天领域、汽车领域及其他方面对目前增材制造的轻量化应用展开综述,最后对增材制造的发展前景进行展望。

## 2 增材制造轻量化应用

### 2.1 航空航天领域

对于航空飞行器来说,主要的影响因素是飞行器的自重,材料的轻质化对航空件的影响最大,实现材质轻

量化有利于飞行器更安全高效地完成飞行任务。有数据表明,若飞机质量减轻 1%,则飞机性能提高 3%~5%,质量的减轻有利于燃油效率和载重的提高<sup>[10]</sup>。采用钛合金、铝合金、镁合金等材料可以实现航空航天以及汽车工业的轻量化改造。在钛合金方面,Ti-6Al-4V(TC4)作为一种典型的  $\alpha+\beta$  型钛合金<sup>[11-12]</sup>,因其具有比强度、比刚度高,韧性好及化学性能、力学性能良好等特点,被广泛用于航空发动机风扇和压气机叶盘、叶片的制造。目前,在先进飞机的制造中,钛合金的用量在 35%以上,在航空工业发达的美国与法国,航空工业 30%左右的钛合金紧固件都采用 TC4 增材制造<sup>[13,14]</sup>。

高质量要求的航空航天结构件增材制造应用,对粉末原材料的质量和性能提出了更高的要求,国内成熟应用的高品质制粉工艺是等离子旋转电极(PREP)法。PREP 法<sup>[15]</sup>制备的粉末球形度高、表面光洁、氧含量低、粉末粒径小,基本不存在卫星粉、空心粉,打印出的航空航天件致密度较高。图 1 为 PREP 法制得粉末的显微形貌<sup>[16]</sup>,可以看出该粉末表面为细的枝晶组织,无卫星粉、表面光洁,且组织均匀、粉末球形度较好,表面质量优异。金属粉末是金属增材制造的基础耗材,由于 PREP 法制备的粉末性能优异,已在航空航天增材制造领域得到了广泛应用。

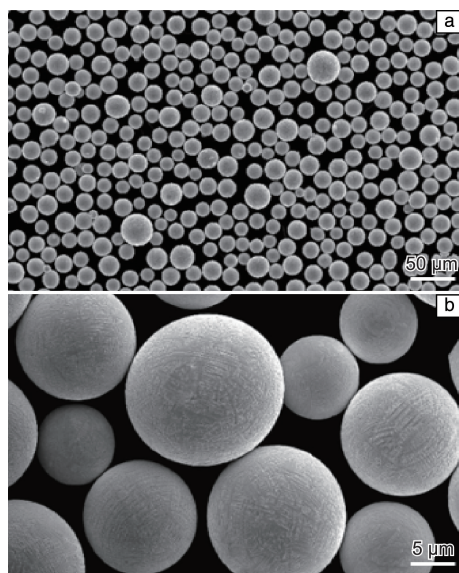


图 1 PREP 法制备的粉末的显微形貌<sup>[16]</sup>

Fig. 1 Micromorphology of the powder prepared by PREP method<sup>[16]</sup>

航空飞行器的轻量化是全球增材制造链的焦点问题。在航空制造方面,APworks 与 The Living 合作用轻质合金采用 SLM 技术打印出仿生的机舱隔离结构,该结构的稳固性和高韧性可以满足飞机的需求,并使其质量减轻了  $25\text{ kg}$ <sup>[17]</sup>。

在航空飞机的研制及零部件加工方面，王华明等<sup>[18]</sup>采用激光快速成型技术将钛合金及超高强度钢制备成用于 C919 飞机的高性能关键整体构件、钛合金主风挡整体窗框和 3 m 高的中央翼条，该方法生产的零件质量较传统锻造方法减轻了 1/10。采用该技术将 Ti15 钛合金打成飞机工字梁典型结构，因其超细的“网篮状”显微结构而具有优异的稳定性的。

激光成型技术<sup>[19]</sup>的使用，大规模节省了时间和成本。尤其是钛合金金属构件，利用激光成型技术能够直接快速生成一个很精致的毛坯，再进行少量的加工，就可直接在飞行器上使用。德国 EOS GmbH 公司<sup>[20]</sup>采用 LMD 技术将 TC4 材料打印为航空航天用座椅扣(图 2a<sup>[21]</sup>)，该结构件的性能较传统方法的更加稳定，且具有足够的强度以防止冲击载荷，质量减轻 55%。美国 GE 公司采用 LMD 技术用钛合金材料对航天用 Leap-X 发动机离心式燃油喷嘴进一步开发，该结构件(图 2b)的质量较传统工艺的降低了 25%，寿命提高了 4 倍，接近锻造的综合性能，能有效避免裂纹缺陷的形成<sup>[21, 22]</sup>。

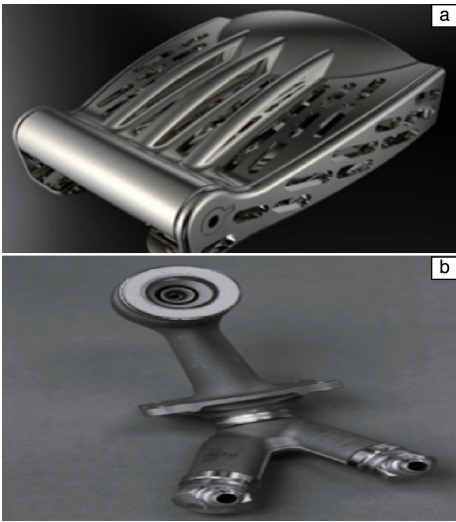


图 2 采用 LMD 技术生产的航天座椅扣(a)<sup>[21]</sup>；Leap-X 发动机的燃油喷嘴(b)<sup>[22]</sup>

Fig. 2 Space seat buckles prepared by LMD technology (a)<sup>[21]</sup>；Fuel nozzle for Leap-X engine (b)<sup>[22]</sup>

美国 Aeromet 公司采用激光成型技术制造了钛合金结构件，该基板的疲劳寿命增加了 10%，减重效率在 5% 以上，且抗蚀、耐磨、耐热性高。采用激光成型技术制造的承力构件面积超过 12 m<sup>2</sup>，不仅研制周期缩短 50%，而且大大减轻了机体的总质量。

采用激光快速成型技术对航空用 TC4 钛合金板件进行了制备与测试，结果表明该结构件的塑性超过了锻件水平，且具有典型的塑性断裂特征，且达到了轻量化要

求<sup>[23-26]</sup>。空客公司采用 SLM 技术研发了由 4 个零件通过 44 个铆钉连接而成的 A380 客机用铝合金支架，并通过优化设计实现了 35% 的减重，同时还提高了 40% 的结构刚度。

增材制造技术是提高航天器设计和制造能力的关键技术，其在航天领域的应用范围不断扩展。国外公司和机构利用增材制造技术不仅打印出卫星的零部件，还打印出航天发动机组件<sup>[27, 28]</sup>等。选区激光烧结技术<sup>[29]</sup>在航天装备领域应用广泛，尤其是在太空发动机方面，该技术的一体化成型与创新式设计使得零件个数减少、结构优化，达到轻量化目标，极大地减轻了质量，节约了成本。英国 GKN 航天公司<sup>[30]</sup>通过激光成型技术对直径为 2.5 m 的 Ariane6 号火箭喷嘴进行加工，最终节省了 40% 的成本。英国 Rolls-Royce 公司<sup>[31]</sup>利用钛合金采用 LMD 技术打印出 48 个尺寸为  $\Phi 1.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$  的 Trent XWB-97 型发动机叶片，生产效率提高了 1/3，质量减轻了 1/4，如图 3 所示。



图 3 LMD 技术打印的用于航空发动机的 Trent XWB-97 型发动机叶片<sup>[31]</sup>

Fig. 3 Trent XWB-97 engine blade of the aircraft engine by LMD method<sup>[31]</sup>

增材制造技术在航天装备的维修制造中也扮演着越来越重要的角色。在受损毁或出故障的装备需要更换零部件时，增材制造可以快速制造出所需部件，仅需一些数据和少数材料、几名技术人员而已；同时，针对太空作业时物资运输资源的短缺问题，增材制造技术在太空中的应用不仅有利于太空材料的回收再利用，而且可以减少太空垃圾<sup>[32-34]</sup>。

2.2 汽车工业领域

汽车轻量化不仅可以提高汽车动力性、安全性和舒适性，还能减少燃料消耗，降低污染排放。随着汽车行业经济飞速增长，汽车企业为赢得市场，需要以最低成本开发出最受欢迎的车型来应对残酷的市场竞争。增材



制造技术最大的优势是可以方便快捷并精确地制备造型复杂的物体,这种独特优势非常适合汽车轻量化产业甚至包括汽车零部件及维修方面的应用<sup>[35, 36]</sup>。

传统汽车造型设计流程是:草图、效果图、数据模型、油泥模型、A 级曲面、样车制造;而采用增材制造技术后汽车造型设计流程是:草图、效果图、数据模型、增材制造样车。使用增材制造技术后,不仅设计流程大大简化,增材制造过程中的一体化成形设计还使得零件个数减少、结构优化,达到轻量化目标。如果车型需要修改,只需修改三维模型,新车的外形设计就可以完成,表 1 列举了汽车增材制造的发展。

表 1 汽车增材制造的发展

| Time and company   | Model                | Characteristic  |
|--------------------|----------------------|---|
| 2004 KUKA, Germany | Audi RSQ concept car | One time molding (high weight)  |
| 2013 Kor Ecologic  | Urbee                | The entire body is made of additive, lightweight and malleable and flexible |
| 2014 LOCA MOTORS   | STRATI               | Lighter vehicle, manufacturing takes 44 h                                   |
| 2016 LOCA MOTORS   | Olli                 | Self-driving electric car   |
| 2017 Divergent     | Blade                | Very light weight, very fast, low energy consumption                        |
| 2018 Divergent     | Dagger               | 50% less weight than traditional manufacturing, high security               |

拓扑优化技术对增材制造轻量化影响显著。西安铂力特增材技术股份有限公司应用 SLM 技术在 BLT-S300 设备上制造的经过拓扑优化的尺寸为 229 mm×103 mm×49 mm 的钛合金汽车车架零件减重至 245 g,减重达 65%,如图 4 所示。付远等<sup>[37]</sup>采用 SLM 技术在 FagC-NC8055 设备上制造了尺寸为 800 mm×600 mm×500 mm 的支撑底座铝合金零件,结合增材制造技术与拓扑优化技术将零件质量减轻了 50%。

增材制造对汽车维修技术带来了很大影响,技术人员可通过增材制造技术直接修复伤口或打印紧缺零部件,延长关键构件的寿命。当大型不易移动的野外作业机械发生故障时,可以携带打印机到现场维修<sup>[38]</sup>。同时,利用增材制造技术,技术人员可以根据设计图纸现场生产出当时所需要的维修工具。此外,技术人员还可以根据实际的维修需求,变通地设计出更利于维修人员操作的工具<sup>[39, 40]</sup>。

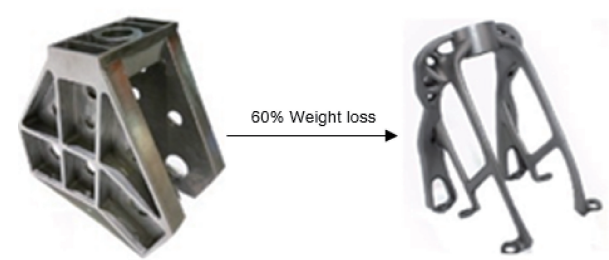


图 4 拓扑优化前后车架零件对比<sup>[37]</sup>

Fig. 4 Comparison of frame parts before and after topology optimization<sup>[37]</sup>

2.3 其它领域

增材制造技术因其独特的轻量化优势不仅在航空航天及汽车领域有广泛的应用,而且在医疗、机械等工业上的应用规模也不断扩大。如图 5 所示<sup>[43]</sup>,未来随着各行业的工业发展,各领域应用增材制造技术的比例将稳步提升。在机械方面,姜繆文等<sup>[41]</sup>运用 LMD 技术用钛合金材料制造了运动员头盔,经过拓扑优化设计的头盔主要采用多孔化及网格化结构,在受到正前方载荷为 500 N 的情况下,其质量减轻了 50%,从材料设计上实现了轻量化。在医学方面,为了避免植入物的质量过大,通常采用增材制造技术打印多孔合金,但是孔隙度和刚度一般很难同时满足,Xiao 等<sup>[42]</sup>采用 SLM 技术对钛合金进行拓扑优化处理,实验计算结果表明,优化后支架的有效弹性模量比优化前的高 13%,并且支架的弹性模量和孔隙度更加接近人体的骨骼组织,这就为增材制造轻量化在医学领域的应用提供了理论支撑,即如何达到孔隙度与刚度的平衡点,是今后增材制造医学研究的主要问题。

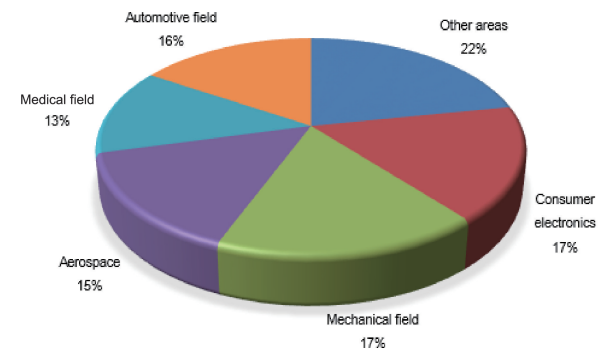


图 5 增材制造在各领域应用的分配比<sup>[43]</sup>

Fig. 5 Distribution of additive manufacturing in various industries<sup>[43]</sup>

3 增材制造的发展趋势

增材制造技术是一个新时代的新兴技术,足以引导第三次工业革命,针对国内外增材制造技术的研究现状,

笔者预测其发展前景可以归纳为以下几点:

(1) 未来, 增材制造技术将面向 5 个“任何”持续发展。即任何领域, 任何场所, 任何材料, 打印出任何形状、任何数量的轻量化产品<sup>[44]</sup>。例如, 将太空“空间站”变为“制造工厂”, 通过运载火箭“快递”原材料、增材制造设备和机器人到其他星球, 首先实现增材制造设备的自我复制, 同时实现基地的打印建造, 为外星移民提供条件。

(2) 增材制造技术的应用将推动高品质钛粉的不断创新。未来钛粉在航空航天及汽车等领域发展潜力巨大, 钛的粉末成型技术将走向个性化、精密化、大型化和轻量化<sup>[45]</sup>。受技术提高的影响, 打印机的成本和价格将大幅降低, 使得民用级别增材制造打印机成为现实。

(3) 科技创新。为新合金材料的研究提供科研平台, 加速中国制造, 基于技术革新实现轻量化, 从而使得航空航天用构件的制造成本大大降低<sup>[46]</sup>。探究“3D 打印+传统制造”的新模式。采取创新的的方法, 加大研究力度, 不断进行改进与更新; 使两种制造方式并存、互补。

(4) 各种新型材料的使用。比如纳米材料、复合材料、金属粉末、新型高聚合材质等, 可以打印出更多类型的实体零件<sup>[47]</sup>。速度、效率突飞猛进且更加环保和轻量化, 使得航空航天及汽车损耗件的快速修复变为可能<sup>[48]</sup>。

(5) 建立航空航天及汽车等方面的增材制造轻量化国家标准, 让增材制造产业市场规范化运行<sup>[49]</sup>。

## 4 结 语

增材制造已成为当今制造工业领域的研究重点, 能够快速实现数字模型实体制造。通过增材制造技术生产的产品, 具有良好的使用性能和力学性能。增材制造技术作为一种快速成型技术得到了快速发展, 对推动全球航空航天及汽车等工业等领域的发展起到了重要作用。但在目前, 增材制造技术的发展仍面临诸多挑战, 就增材制造设备来说, 打印设备的成型仓大小限制了成品的尺寸; 且原材料成本过高, 解决不了目前市场行业内 20%~30% 的物品需求。还有诸如信息安全、质量保证、知识产权等问题都需要不断改进。随着增材制造技术的日趋成熟和材料的扩充, 增材制造技术有望成为 21 世纪的标杆技术之一。此外, 增材制造应与先进能源技术相结合, 开发出更加节能环保的产品。

## 参考文献 References

[1] 卢秉恒, 李涤尘. 机械制造与自动化[J], 2013, 42(4): 1-4.  
LU B H, LI D C. Mechanical Manufacturing and Automation[J], 2013, 42(4): 1-4.  
[2] DIZON J R C, ESPERA J A H, CHEN Q, *et al.* Additive Manufactur-

ing[J], 2018, 20: 44-67.  
[3] 徐文鹏, 王伟明, 李航, 等. 计算机研究与发展[J], 2015, 52(1): 38-44.  
XU W P, WANG W M, LI H, *et al.* Computer Research and Development[J], 2015, 52(1): 38-44.  
[4] 周松. 基于 SLM 的金属 3D 打印轻量化技术研究与应[D]. 浙江: 浙江大学, 2017: 1-77.  
ZHOU S. Research on Lightweight Technology of Metal 3D Printing Based on SLM and Its Application[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2017: 1-77.  
[5] THRYFT A R. Design News[J], 2016, 71(3): 30-33.  
[6] LIU R, WANG Z, SPARKS T, *et al.* Aerospace Applications of Laser Additive Manufacturing[M]. Missouri-United States: Missouri University of Science and Technology, 2017: 351-371.  
[7] 史玉升, 钟庆, 陈学彬, 等. 机械工程学报[J], 2002, 38(2): 35-39.  
SHI Y S, ZHONG Q, CHEN X B, *et al.* Journal of Mechanical Engineering[J], 2002, 38(2): 35-39.  
[8] 刘媛媛, 张付华, 陈伟华, 等. 机械工程学报[J], 2014, 50(15): 147-154.  
LIU Y Y, ZHANG F H, CHEN W H, *et al.* Journal of Mechanical Engineering[J], 2014, 50(15): 147-154.  
[9] 陈梦婷, 石建军, 陈国平. 粉末冶金工业[J], 2017, 27(4): 66-72.  
CHEN M T, SHI J J, CHEN G P. Powder Metallurgy Industry[J], 2017, 27(4): 66-72.  
[10] 付远, 罗哲, 辛增念, 等. 机械工程师[J], 2016(11): 36-39.  
FU Y, LUO Z, XIN Z N, *et al.* Mechanical Engineer[J], 2016(11): 36-39.  
[11] PARTHASARATHY J, STARLY B, RAMAN S, *et al.* Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials[J], 2010, 3(3): 249-259.  
[12] 杨鑫, 奚正平, 刘咏, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2009, 38(7): 1272-1275.  
YANG X, XI Z P, LIU Y, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2009, 38(7): 1272-1275.  
[13] 刘全明, 张朝晖, 刘世锋, 等. 钢铁研究学报[J], 2015, 27(3): 1-4.  
LIU Q M, ZHANG Z H, LIU S F, *et al.* Journal of Iron and Steel Research[J], 2015, 27(3): 1-4.  
[14] LEYENS C, 陈振华. 钛与钛合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 19-20.  
LEYENS C, CHEN Z H. Titanium and Titanium Alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 19-20.  
[15] YIN J G, CHEN G, TANG H P, *et al.* Titanium Powder Metallurgy and Additive Manufacturing[J], 2018: 18-22.  
[16] 韩寿波, 张义文, 田象军. 粉末冶金工业[J], 2017, 27(6): 44-51.  
HAN S B, ZHANG Y W, TIAN X J. Powder Metallurgy Industry[J], 2017, 27(6): 44-51.

- [17] 王晓燕. 世界制造技术和装备市场[J], 2018(1): 68-74.  
WANG X Y. World Manufacturing Technology and Equipment Market [J], 2018(1): 68-74.
- [18] 刘俊卿. 中国经济和信息化[J], 2013(2): 42-45.  
LIU J Q. China Economy and Informationization[J], 2013(2): 42-45.
- [19] GAO H, SHEIKHOLESAMI G, DEARDEN G, *et al.* Procedia Engineering[J], 2017, 183: 369-374.
- [20] DUTTA B, FROES F H. Advanced Materials Research [J], 2014, 1019(2): 19-25.
- [21] 刘业胜, 韩品连, 胡寿丰, 等. 航空制造技术[J], 2014, 454(10): 62-67.  
LIU Y S, HAN P L, HU S F, *et al.* Aviation Manufacturing Technology[J], 2014, 454(10): 62-67.
- [22] 张小伟. 航空动力学报[J], 2016, 31(1): 10-16.  
ZHANG X W. Journal of Aeronautical Power [J], 2016, 31(1): 10-16.
- [23] PINKERTON A J. Optics & Laser Technology [J], 2016, 7(2): 58-63.
- [24] KNIGHT H. Engineering[J], 2015(2): 2-21.
- [25] ANGRISH A. A Critical Analysis of Additive Manufacturing Technologies for Aerospace Applications[C]//Proceedings of the Aerospace Conference. United States; North Carolina State University, 2014: 1-6.
- [26] HAN P. Engineering[J], 2017, 3(5): 648-652.
- [27] KUMAR L J, NAIR C G K. Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry[M] // Advances in 3D Printing: Additive Manufacturing Technologies. Singapore: Springer, 2017.
- [28] LI M X, QU W Q. Materials Science Forum[J], 2014, 789: 377-383.
- [29] 刘景博, 刘世锋, 刘全明, 等. 兵器材料科学与工程[J], 2018(4): 1-6.  
LIU J B, LIU S F, LIU Q M, *et al.* Ordnance Material Science and Engineering[J], 2018(4): 1-6.
- [30] 路讯. 粉末冶金工业[J], 2009(2): 40.  
LU X. Powder Metallurgy Industry[J], 2009(2): 40.
- [31] 谭立忠, 方芳. 战术导弹技术[J], 2016(4): 1-7.  
TAN L Z, FANG F. Tactical Missile Technology[J], 2016(4): 1-7.
- [32] FROES F H. Advanced Materials and Processes[J], 2017(175): 36-40.
- [33] MATTHEWS N. Aircraft Sustainment & Repair[J], 2018: 845-862.
- [34] WATSON J K, TAMINGER K M B. Journal of Cleaner Production [J], 2015(176): 1316-1322.
- [35] 杨志强, 于发田, 尧松, 等. 汽车工艺与材料[J], 2014(9): 42-45.  
YANG Z Q, YU F T, YAO S, *et al.* Automotive Technology and Materials[J], 2014(9): 42-45.
- [36] 刘洋子健, 夏春蕾, 张均, 等. 工程塑料应用[J], 2017, 45(3): 130-133.  
LIU Y Z J, XIA C L, ZHANG J, *et al.* Engineering Plastics Application[J], 2017, 45(03): 130-133.
- [37] 付远, 罗哲, 辛增念, 等. 机械工程师[J], 2016(11): 36-39.  
FU Y, LUO Z, XIN Z N, *et al.* Mechanical Engineer[J], 2016(11): 36-39.
- [38] 王辉, 胡增荣, 季苏琴, 等. 内燃机与配件[J], 2018(1): 169-170.  
WANG H, HU Z H, JI S Q, *et al.* Internal Combustion Engine and Accessories[J], 2018(1): 169-170.
- [39] STEINHIPER R, NAGEL A. Procedia Cirp[J], 2017, 61: 183-188.
- [40] 闫健卓, 姜繆文, 陈继民. 北京工业大学学报[J], 2017, 43(4): 551-556.  
YAN J Z, JIANG M W, CHEN J M. Journal of Beijing University of Technology[J], 2017, 43(4): 551-556.
- [41] 姜繆文, 陈继民, 闫健卓. 应用激光[J], 2017, 37(3): 424-429.  
JIANG M W, CHEN J M, YAN J Z. Application Laser[J], 2017, 37(3): 424-429.
- [42] XIAO D, YANG Y, SU X, *et al.* Bio-Medical Materials and Engineering[J], 2013, 23(5): 433-445.
- [43] 马晨璐. 中国钛业[J], 2018(1): 16-19.  
MA C L. China Titanium Industry[J], 2018(1): 16-19.
- [44] LU B, LI D, TIAN X. Engineering[J], 2015, 1(1): 85-89.
- [45] 徐志超, 王迪, 史庆南, 等. 材料导报[J], 2017, 31(1): 70-77.  
XU Z C, WANG D, SHI Q N, *et al.* Material Review[J], 2017, 31(1): 70-77.
- [46] 刘雷, 刘禹, 张婕. 科技导报[J], 2017, 35(17): 21-29.  
LIU L, LIU Y, ZHANG J. Science & Technology Review[J], 2017, 35(17): 21-29.
- [47] LI T, CHEN Y, HU X, *et al.* Materials & Design[J], 2018, 142: 247-258.
- [48] PAPACHARALAMPOPOULOS A, BIKAS H, STAVROPOULOS P. Procedia Manufacturing[J], 2018(21): 757-764.
- [49] KAPETANIOU C, RIEPLE A, PILKINGTON A, *et al.* Technological Forecasting & Social Change[J], 2018, 128: 22-35.

(编辑 吴 锐)