

面向高端装备的金属激光增材制造技术发展与应用

杨凯^{1,2} 王磊³ 汤永凯³ 刘谋斌^{1*} 郭子傲²

1. 北京大学工学院, 北京, 100871

2. 湖南云箭集团有限公司, 长沙, 410100

3. 西安交通大学高端制造装备协同创新中心, 西安, 710049

摘要: 综述了金属激光增材制造技术在高端装备制造中的创新应用与发展, 介绍了其基本原理与优势, 涵盖实现复杂结构的一体化制造、材料与结构的优化设计, 以及部件的性能提升; 探讨了激光增材制造技术在新材料开发、新工艺创新、新结构设计和新功能集成等方面为高端装备制造带来的创新机遇; 分析了当前在高端装备制造领域应用金属激光增材制造技术所面临的挑战, 如材料体系开发和新材料应用、制造装备开发、制造过程在线监测与质量控制技术, 以及零件后处理等技术难题。最后, 对高端装备应用金属激光增材制造技术的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 激光增材制造; 高端装备; 创新应用; 发展趋势

中图分类号: TH162

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development and Applications of Metal Laser Additive Manufacturing Technology for High-end Equipment

YANG Kai^{1,2} WANG Lei³ TANG Yongkai³ LIU Moubin^{1*} GUO Ziao²

1. School of Engineering, Peking University, Beijing, 100871

2. Hunan Yunjian Group Co., Ltd., Changsha, 410100

3. Collaborative Innovation Center of High-end Manufacturing Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049

Abstract: A comprehensive review of the innovative applications and development of laser additive manufacturing technology in high-end equipment manufacturing was provided. Firstly, the basic principles and advantages were introduced, including the ability to achieve integrated manufacturing of complex structures, optimized design of materials and structures, and improvement of component performance. Further, the innovative opportunities brought by laser additive manufacturing technology to high-end equipment manufacturing in aspects were discussed such as new material development, new process innovations, new structures design, and new functions integration. The challenges faced in the applications of laser additive manufacturing technology in high-end equipment manufacturing were analyzed, such as technical difficulties in material system development and new material applications, manufacturing equipment development, online monitoring and quality control technology during the manufacturing processes, and improvement of post-processing technologies. Finally, the future development trends of laser additive manufacturing technology for high-end equipment were outlooked.

Key words: laser additive manufacturing; high-end equipment; innovative application; development trend

0 引言

高端装备制造是国家经济建设和国防安全重要的物质和技术基础, 其发展水平和发展层次是国家科技进步和国民经济发展的综合体现。当前, 以

增材制造(亦称3D打印)为代表的新制造技术改变了产品的设计制造过程, 被视为诸多领域科技创新的“加速器”, 对制造业起到巨大推动作用^[1]。在工业领域, 高性能大型金属激光增材制造构件在新产品研制中不断获得技术突破^[2-5], 激光增材制造成品正在规模化地集成到现有产品的制造流程甚至供应链中, 革新传统制造方法并降低制造成本^[6]。

随着增材制造技术的持续演进和创新, 其制

收稿日期: 2024-11-21

基金项目: 中国兵器装备集团有限公司关键核心技术攻关项目

(HXJS-2023-006)

造工艺、适用材料、设备加工能力、技术标准等不断得到优化和完善,激光增材制造技术正在扩展到更多的高端装备设计及生产中。激光增材制造技术在高端装备制造领域的应用包括航天器、航空器、弹体、卫星、无人机和其他军用高端装备等的零部件生产,如:我国将增材制造技术应用在飞机新概念结构设计与工程中^[3];美国海军研制并实验引爆了一种增材制造含能材料的弹药,该弹药不仅能提高杀伤力而且能根据任务调整自身系统^[7];洛克希德·马丁公司利用3D打印在高超声速飞行器相关领域持续开展研究,完成了高超声速冲压喷气发动机的制造和评估^[8]。随着运载装备领域的发展,采用激光增材制造技术突破传统设计局限,缩短研制周期,直接制造含有复杂精细结构的大尺寸结构件或精密灵巧的结构功能一体件是当前国内外高端装备制造领域重点关注的研究热点与应用方向,如弹体结构^[9]、发动机构件、飞行器复杂金属构件^[3-5,10]等采用激光增材制造等新技术加快推进各类装备高速、高效和高质地研制和跨代发展。尽管激光增材制造技术在高端制造领域的应用取得了显著进展,但其本身正处于不断发展和变革过程中。目前,关于金属激光增材制造技术的研究现状,已有很多研究团队发表了相关文献综述^[2,4,11-13],然而,关于激光增材制造技术在高端装备制造方面的技术综述文章较少,针对于此,本文对激光增材制造在高端装备制造领域的创新应用与技术发展趋势进行综述研究,以期推动激光增材制造技术在高端装备制造领域的技术攻关和技术升级。

1 激光增材制造技术概念与内涵

激光增材制造(laser additive manufacturing, LAM)技术是一种以激光为能量源,通过精确控制激光束对粉末、丝材等原材料进行熔化或烧结,按照预设的三维模型数据进行材料堆积,从而直接制造出复杂形状实体零件的先进制造技术^[2]。从原理上看,激光增材制造技术采用一种“自下而上”的制造方式,利用高能量密度的激光束在瞬间将原材料加热至熔化或半熔化状态,随后快速冷却凝固,实现材料的逐层堆积成形。在技术分类上,主要包括激光粉末床熔融(laser powder bed fusion, LPBF)、激光定向能量沉积(laser directed energy deposition, LDED)等^[11]。激光定向能量沉积技术又可细分为激光送粉增材制造工艺、激光旁轴送丝增材制造工艺、激光同轴送丝增材

材制造工艺、激光丝材与粉末同步送进增材制造工艺以及激光与多能场复合增材制造工艺。为便于区别,本文将激光增材制造技术划分为6种工艺,如图1所示,各个工艺的技术特点和应用场景如表1所示。

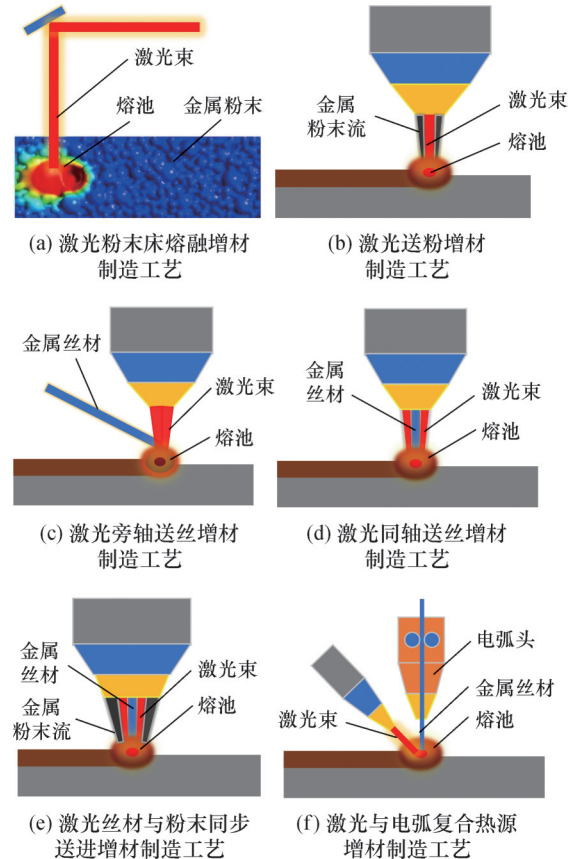


图1 激光增材制造技术主要工艺

Fig.1 Key processes of laser additive manufacturing technology

1) 激光粉末床熔融增材制造工艺。利用高功率激光束对粉末床上预先铺设的粉末进行选择性的熔融,一层一层地堆积成形,直至制造出所需的三维零件。

2) 激光送粉增材制造工艺。该工艺通过将粉末材料输送到激光作用区域,激光束熔化粉末,逐点、逐线、逐面地堆积成形。

3) 激光旁轴送丝增材制造工艺。送丝装置与激光熔覆头呈一定角度布置,丝材通过送丝装置送入激光作用区域,随着工作台的移动或激光头的移动,丝材不断熔化并堆积,形成三维零件。

4) 激光同轴送丝增材制造工艺。送丝装置与激光头同轴布置,丝材从激光束的中心通过并被激光熔化,这种方式可以保证激光与丝材的作用更加集中和稳定,提高成形质量和效率。

5) 激光丝材与粉末同步送进增材制造工艺。将丝材和粉末同时输送到激光作用区域,激光束

表1 激光增材制造类型和技术特点

Tab.1 Types and technical characteristics of laser additive manufacturing

编号	工艺类型	技术特点	应用场景
1)	激光粉末床熔融增材制造工艺	精度高、表面质量好,多曲面复杂结构成形一致性好,实现了高效率和高精度的有效结合	适合小批量生产
2)	激光送粉增材制造工艺	材料利用率高、材料适应性强	适合中型、大型零件制造和修复
3)	激光送粉增材制造工艺	送丝稳定、易于操作、材料利用率高	适合大型零件制造和修复
4)	激光送粉增材制造工艺	丝材与激光束同轴,方向性好,多曲面复杂结构成形一致性好,实现了高效率和高精度的有效结合	适合大型零件制造和修复
5)	激光丝材与粉末同步送进增材制造工艺	工艺灵活性强,结合了丝材和粉末的优点	适合大型零件制造和修复,多材料制造
6)	激光与多能场复合增材制造工艺	结合了激光和多能场的优势	适合大型零件制造和修复,增强材料性能

同时熔化丝材和粉末,综合利用丝材和粉末的特性进行零件制造。这种工艺可以结合丝材的高效堆积和粉末的精细成形能力,实现更复杂结构和高性能零件的制造。

6) 激光与多能场复合增材制造工艺。结合激光和多种能场或复合热源进行增材制造,如激光具有高能量密度、高精度的特点,而电弧则具有较高的热输入和效率,通过合理控制激光和电弧的参数,充分发挥两种热源的优势,提高制造速度、降低成本,并改善零件的性能。

激光增材制造技术通过高精度的能量控制,使得材料逐点/微区域熔化并逐层堆积,精确构建出三维模型,提高材料利用率,缩短了新产品开发周期。这种技术不仅能够实现复杂几何结构的一体化设计和制造,还支持多材料、多功能结构的集成应用,从而极大地扩展了材料选择和结构设计的边界,提高高端装备部件的性能。此外,激光增材制造技术在修复和定制化生产方面也展现出巨大潜力,为高端装备制造领域带来了革命性的技术创新。

2 激光增材制造在高端装备的创新应用

目前,在高端装备制造领域中,各种高端高性能材料的应用比例不断提高,如从高强钢、高温合金、钛铝合金扩展到多材料等。激光增材制造的典型金属结构的力学性能趋于稳定,制备的新材料呈现出高强高韧和低屈强比特征,甚至部分超

过锻件性能^[6,12-15]。在高端装备制造领域,激光增材制造在新材料、新工艺、新结构、新功能等方面带来的创新应用如图2所示。

2.1 高端装备激光增材制造的新材料应用

在制造高性能合金材料部件方面,激光增材制造技术已应用在铝合金、钛合金、高温合金等材料的高性能制造中^[11,16-21]。研究人员利用激光定向能量沉积技术制造了一种新的 $\alpha+\beta$ 钛合金,抗拉强度和延展性可达到 1247 ± 3 MPa和 $9.2\%\pm 0.2\%$,具有强度高和延展性好的特性^[12]。TAN等^[19]在激光粉末床增材制造过程中加入SiC颗粒,诱导C300马氏体时效钢(MS)原位析出相的形成,从而制备出SiC和原位析出相双相增强的MS基复合材料,制备的马氏体金属基复合材料的抗拉强度和屈服强度分别达到1.6 GPa和1.2 GPa,相比基体材料分别提高了38%和29%,同时保持了10.1%的延伸率。SOGN等^[20]将合金设计概念与增材制造工艺相结合,成功制备出一系列具有优异拉伸性能的钛-氧-铁合金,有望在航空航天等高端装备中获得应用。这些新材料的开发为高端装备零部件选材提供了新思路。另外,张纪奎等^[21]利用激光增材制造技术成功制备出了钛合金航空主承力结构,所制备的零件具有细小均匀的等轴晶组织,显著提高了零件的强度、韧性和抗疲劳性能,可应用在先进战斗机、大型运输机、大型运载火箭、卫星、弹体结构等领域。与传统制造方法相比,激光增材制造的钛合金大部件的制造周期缩短,成本大幅降低。在激光增材制造铝合金强韧化研究方面,研究人员通过纳米陶瓷增强和原位陶瓷增强尝试改善陶瓷/金属界面的润湿性及结合性,抑制界面上的微观孔隙及裂纹,进而提高激光成形件的力学性能^[4,22-23]。与此同时,镍基高温合金增材制造零件也越来越多地应用到火箭发动机尾喷管、巡飞弹燃烧室等。

在多材料复合和功能梯度材料方面,激光增材制造技术也展现出了巨大的创新潜力^[24-29]。多材料增材制造技术可以减少弹体多零部件组装存在的制造装配成本高和潜在的安全隐患问题,如可以实现多材料零件机构功能一体化设计与制造^[30]。大型液体火箭发动机燃烧室使用了铜合金衬套和镍合金外套的复合材料,其中,内部的铜合金衬套具有足够高的热传导性,以保证多余热量及时散失,外部的镍合金衬套提供足够高的支撑强度。通过整合两种合金性能的优势,多材料增材制造零件能够满足极端温度和压力环境下的工

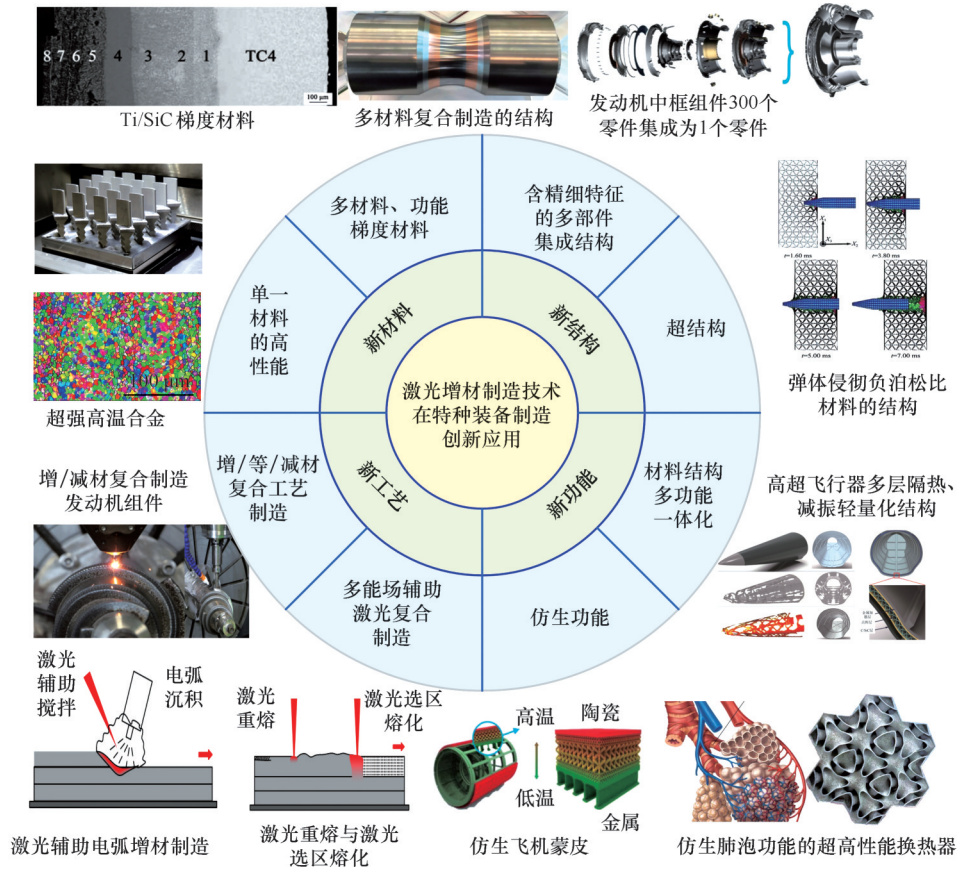


图2 增材制造在高端装备制造的创新应用案例

Fig.2 Innovative application cases of additive manufacturing in high-end equipment manufacturing

作性能^[31]。在激光增材制造过程中,研究人员通过在结构制造过程中将多材料化学成分混合,或者在结构界面处添加不同材料,逐渐改变化学组成和结构,精确控制不同材料的堆积顺序和比例,实现材料性能连续梯度变化。文献[28-29]梳理回顾了激光增材制造技术在功能梯度金属基材料设计、开发和应用方面的最新研究进展。有学者通过激光增材制造技术成功制备出了陶瓷增强金属基复合材料的高端装备防护装甲^[32]。该防护装甲采用功能梯度设计,从外层到内层分别由高硬度陶瓷、陶瓷增强金属基复合材料和高强度金属组成。这种功能梯度装甲不仅具有优异的抗冲击性能和防护能力,还能有效减小质量,提高高端装备的机动性和作战效能。此外,还有研究团队利用激光增材制造技术制备出了具有梯度硬度的刀具^[29],通过在刀具表面逐渐增加硬质合金的含量,形成了从软到硬的梯度结构,提高了刀具的耐磨性和切削性能,可广泛应用于高端装备的加工制造领域。

2.2 高端装备激光增材制造的新工艺应用

当前,增减材复合工艺制造、增等材复合工艺制造以及增减材复合工艺制造已应用在高端装备的零部件制造中^[12,33-35],为高性能复杂结构件和

精密功能组件一体化快速制造提供了新的解决方案。有研究团队将增材制造的高成形自由度工艺与超精密加工的高精度工艺相结合,采用激光粉末床熔融增材制造和单点金刚石加工相结合的工艺方式,制造了高精度、高强度的铝合金光学结构件,为推动光学系统在高端装备领域的应用提供了重要动力^[34]。有学者将增材制造和减材制造相结合,充分发挥两种工艺的优势,采用增材制造技术先打印出具有复杂内部结构和良好力学性能的发动机叶片的毛坯,然后在同一设备上上进行减材加工,去除多余的材料,提高了叶片的精度和表面质量,使其满足航空发动机的严格要求^[35-36]。利用增减材复合制造的整体叶轮如图3所示。

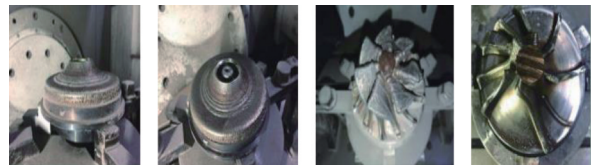


图3 小型涡喷发动机的整体式叶轮增材成形过程^[34]

Fig.3 Additive manufacturing process of the integral impeller for a small-scale turbojet engine^[34]

多能场辅助激光增材制造是近年来研究的热点。在激光增材制造过程中,除了激光作为能量源外,还有其他多种能量场,如电磁场、超声场、热

场等^[37-41]。利用每种能量场独特的物理特性和作用方式,在增材制造过程中相互配合、协同作用,相关学者曾尝试解释外场-激光-材料-组织-性能间的作用机理^[39]。YOON等^[40]在激光增材制造钛合金零部件过程中施加电磁场,对熔池的流动和凝固行为进行控制,通过调整电磁场的参数如磁场强度、频率等改变熔池内金属液体的流动方式和凝固速度,从而细化晶粒,减少缺陷,提高了材料的强度和韧性。LI等^[41]利用超声振动辅助激光增材制造技术,超声场能够引起熔池内的声波振动,促进粉末的铺展和熔池的搅拌,使不锈钢的致密度提高10%以上。WANG等^[42]在激光增材制造过程中通过焦耳热场对材料进行预热,提高激光能量吸收率和材料的流动性。在制造大型结构件时,可利用激光与热场复合辅助技术降低结构件的残余应力,提高尺寸精度和形状精度^[43]。多能场辅助激光增材制造能够改善材料的微观组织和结构,减少缺陷,提高零件的制造精度和力学性能。此外,多能场辅助技术可以改善不同材料之间的界面结合情况,提高多材料制造的质量和可靠性,为高端装备制造出具有多种功能的复合材料零件提供了可能。

2.3 高端装备激光增材制造的新结构应用

在大型、超大型金属结构件整体制造方面,激光增材制造技术显示出独特的优势。激光增材制造技术在钛合金大型构件“控形/控性”制造技术方面获得技术突破^[2],已完成整体复杂主承力飞机加强框等关键构件的制造和应用试验。为了保证严酷服役环境下的结构防热、承载、振动等综合性能以及轻量化设计要求,王向明^[3]提出了无设计分离面连接的机翼-机身整体结构,与传统对接结构相比,一体化结构拥有更少的零部件、更小的质量、均匀的应力分布和更佳的工艺性能,如图4a所示。近年来,针对高超声速飞行器及先进航天运载器薄壁构件热结构失效问题、结构维形失效问题、振动失效问题等,张卫红等^[5]提出了飞行器机身材料-结构-性能的一体化设计,如图4b所示。激光增材制造技术正在推动高端装备零部件的跨尺度结构、多部件集成一体化设计制造^[44]。现阶段,激光增材制造的新结构已应用在运载火箭及载人飞船主承力构件、火箭发动机燃烧室等航天装备领域^[45-47]。增材制造技术可以突破传统工艺的加工和设计局限,实现高性能复杂结构零件的一体化直接成形,在航空发动机及燃气轮机领域有着巨大的应用潜力^[47-48]。在微观尺度上,

采用特定的激光扫描策略和参数控制材料的凝固过程,可形成具有优异力学性能的纳米级和微米级晶体结构;在宏观尺度上,将单个叶片的冷却通道、气膜孔等功能结构与叶盘主体进行一体化设计和制造,可减少部件之间的连接和装配环节,提高发动机的整体性能和可靠性。参考在航空航天等大型结构件中的应用,可以将激光增材制造技术应用到军用装备^[49]和运载车辆的悬挂系统、传动系统等关键部件中。在微观尺度上,可以优化激光工艺参数,控制材料的微观组织,提高部件的强度和韧性。在宏观尺度上,将多个功能部件进行一体化设计和制造,可以减少部件之间的连接和装配环节,提高高端车辆的整体性能和可靠性。此外,一体化制造可减少传统制造方法中的加工工序和装配误差,提高高端车辆的可靠性和维护性。采用跨尺度结构设计,可使得高端车辆关键部件在满足高强度、高可靠性要求的同时更加紧凑和轻便,提高高端车辆的机动性和作战效能。

金属点阵晶状结构具有高比强度、高比刚度、抗爆吸能、减振降噪等轻量化、超材料超结构优势^[50-51],在高端装备创新设计中得到了越来越多的青睐,超结构如图4c所示。当前,金属点阵晶状结构在飞行器主承力结构、卫星支架、船舶舱室和装甲车辆防护装甲等领域已有应用,如利用激光增材制造技术制造具有高度有序晶状点阵结构的防弹装甲。利用激光增材制造技术制造具有负阻尼特性的超结构减振器^[52-55]。文献^[56-57]展示了通过金属增材制造技术特别是激光粉末床增材制造技术设计和制造出具有复杂内部结构的晶格特征和超结构。超结构往往具有宏微观跨尺度特点,传统制造技术难以实现,激光增材制造技术通过精确控制制造参数,可以实现对晶格结构的微观结构和宏观性能的精确调控,从而满足高端装备制造的严格要求^[58-59]。任鑫等^[60]利用激光增材制造技术开发了负泊松比结构,颠覆了传统的材料特性。传统结构在受到拉伸时通常会在垂直方向上收缩,然而负泊松比结构却展现出截然不同的特性——在拉伸时,它们会在垂直方向上膨胀。负泊松比结构可以用于设计更轻量、更坚固、能更分散和吸收冲击能量的结构部件,为高端运载装备安全领域的技术创新提供了方向。此外,在声学超结构方面,研究人员通过设计具有特定几何形状和材料组成的晶状点阵结构单元,利用激光增材制造技术制造的声学超结构具有优异的声波吸收、反射和透射性能,为高端装备的声学隐

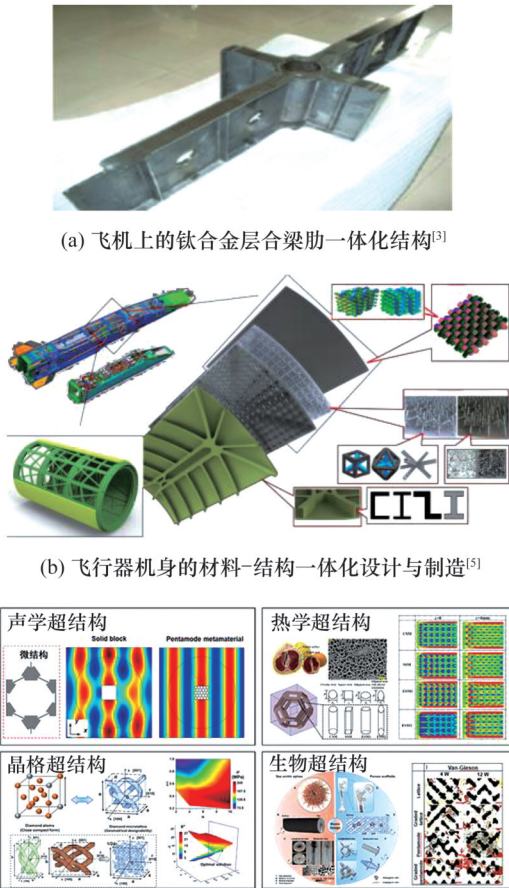


图4 增材制造新结构应用案例
Fig.4 Application of novel structural designs in additive manufacturing

身和通信提供了新的解决方案^[61-63]。

2.4 高端装备激光增材制造的新功能应用

近年来,材料、结构、功能的一体化设计与制造技术突破^[5,44]为装备制造领域提供了新的技术手段和解决方案。张啸雨等^[64]利用激光增材制造技术制造出了蒙皮点阵一体化的卫星组件。在材料选择上,采用高强度、低密度的铝合金材料,并通过优化材料成分和微观结构,提高了材料的力学性能;在结构设计上,采用外部蒙皮+内部三维点阵、变密度晶格结构,既保证了结构强度和刚度,又减小了质量;在内部还设计了含有流道等特殊功能的复杂构型;对结构件表面进行特殊的涂层处理,提高了其抗辐射和耐腐蚀性能,实现了材料、结构和功能的一体化。类似这种超轻型金属晶格结构,既可实现高端装备复杂结构的轻量化设计,又可实现极其复杂结构的功能集成,在突破技术瓶颈、减重、提升性能、缩短周期、降低成本等方面产生了较大的综合效益。有研究团队提出基于多样化功能驱动的宏观/微观结构一体化增材制造技术,针对金属、陶瓷、复合材料等多种材料

类型,创新工艺装备,推动增材制造技术在先进复合材料、超结构、多功能金属构件等功能结构制造方面的创新应用^[65-66]。图5为增材制造的仿生多功能结构示意图。

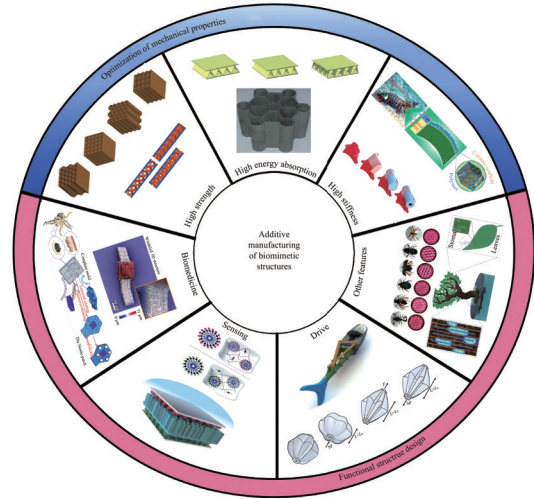


图5 增材制造仿生多功能结构示意图^[65]
Fig.5 Schematic diagram of bio-inspired multifunctional structures via additive manufacturing^[65]

基于增材制造技术开展的具有仿生功能的创新设计与应用为高端装备研制提供了新的灵感和方法。在高端装备换热器领域,利用激光增材制造技术进行具有仿生肺泡功能的换热器开发是一个引人注目的研究方向。研究人员探讨了使用激光增材制造技术制作的仿生肺泡启发式紧凑型板式换热器的热流体效率,这些换热器由钢、铝和钛粉末制成,如图6所示^[67]。与传统钎焊板式换热器相比,新型换热器可以实现更高的热传递率,同时最小化压降。迟百宏等^[68]开展了跨介质飞行器空中电磁隐身-水下隔声-超疏水减阻一体化超材料结构设计,利用激光增材制造技术实现了具有空中电磁隐身、水下声波隐身以及航行减阻功能。还有研究探讨了激光增材制造生物启发金属结构的最新进展^[69-71]。这些研究涉及的生物包括蝴蝶、挪威云杉、螳螂虾、甲虫和水蜘蛛,为激光增材

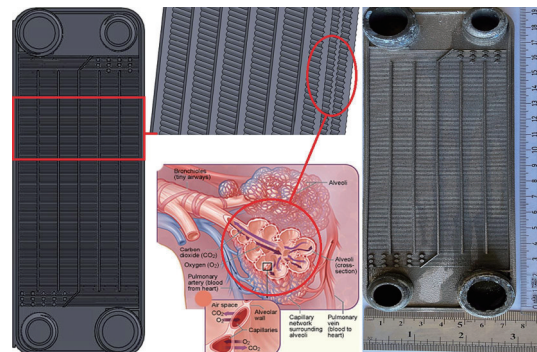


图6 仿生肺泡功能的换热器^[67]
Fig.6 Heat exchanger with bionic alveolar function^[67]

制造多功能结构提供了多样性。YUAN等^[69]通过模仿乌贼骨,提出并通过激光增材制造技术成功制造了一种新型仿生混合结构。这些仿生新功能技术在航空航天海工等高端装备制造领域具有潜在的应用前景。

3 高端装备激光增材制造技术面临的挑战

目前,激光增材制造技术正处于快速发展中,但在高端装备的进一步应用仍然面临一些技术挑战和困难。

1) 高端装备激光增材制造的材料体系有限。虽然激光增材制造技术使用市面上的多种成熟金属材料满足了部分需要,但高端装备所使用的材料往往具有特殊的性能要求,如耐高温、耐腐蚀、高强度等,适用的材料体系还比较有限。目前对新开发的高强度合金、高端合金、金属基复合材料等在激光增材制造过程中的微观结构变化、相转变、晶粒生长等方面的认识还不够深入,部分材料在激光增材制造过程中容易出现裂纹、孔隙等缺陷,或者难以达到所需的性能要求^[72]。在新开发的多材料激光增材制造过程中,由于不同材料的物理、化学性质差异较大,材料成形界面处容易出现应力集中、孔隙、裂纹等缺陷,影响成形零件的整体性能,相关技术仍处于探索中。新材料制备工艺的稳定性 and 一致性难以保证,波动性较大,难以保证每一批次材料和样品的性能数据都完全一致。针对新材料成形的工艺参数,如激光功率、扫描速度、送粉速度、扫描策略等研究不足。这些问题将导致难以准确预测和控制成形件的性能,材料性能数据库也没有建立,限制了该技术在高端装备制造中的应用。此外,尽管新兴材料如高/中熵合金和异质结构材料表现出良好的机械性能,在实际应用于高端装备零部件之前,深入了解这些材料的工艺参数、微观结构、力学性能之间的关系,仍然需要严格的表征、测试、鉴定和认证。

2) 激光增材制造装备开发有待发展。面向高端装备零部件制造,激光增材制造装备有待提高装备的制造精度和可靠性。高端装备对零件的精度和力学性能要求非常严格,而大幅面选区熔化激光增材制造设备在精度稳定性和可靠性方面还存在不足。大型粉末床激光选区熔化装备采用阵列式多激光方案,激光数量过多和粉末床幅面过大带来了系列技术难题,如多激光系统的协同工作问题,还存在激光能量的波动、多光束拼接质

量不一致、送粉或铺粉不均匀、扫描路径智能规划等难题,再加上成形过程中装备自身质量的渐进变形与振动等因素都会影响零件的制造精度和成形质量。目前,针对大尺寸精细结构制造的激光选区熔化增材制造装备进入发展瓶颈。

面向高端装备大尺寸零部件的大型设备的研发和应用受限。适应于大型、超大型金属结构的激光增材制造设备的研发和制造难度较大,大功率能量传输、长距离粉末和丝材输送等方面都存在技术挑战,成本较高。将激光送粉增材制造打印头和激光送丝增材制造打印头集成在大型机床装备开展大型零部件制造具有灵活性高的优势,然而激光增材制造的成形效率仍然不满足大型结构的制造需求,叠加上金属材料在空气中的氧化、气孔缺陷和应力开裂问题仍然未有更好的技术方案解决。上述问题限制了该技术在再制造大型高端装备零部件中的应用。

3) 增材制造过程在线检测与质量控制技术有待发展。在高端装备激光增材制造过程中,零件内部缺陷及时检测的技术难度大,仍然缺少高效低成本无损检测技术手段。激光增材制造过程是一个快速、复杂的热物理过程,零件内部缺陷(如孔隙、裂纹、夹杂等)难以通过常规的检测方法进行检测,这些内部缺陷会严重影响零件的性能和可靠性,而目前的无损检测技术(如X射线检测、超声检测等)对复杂形状零件的检测效果还不够理想,检测精度和分辨率有待提高^[73-74]。同时,激光增材制造过程是一个快速的动态过程,内部缺陷实时监测和反馈控制对保证制造质量非常重要,而激光增材制造过程在线监测和实时反馈的控制技术还不够成熟,难以准确地获取制造过程中的关键参数,如熔池温度、熔池形状、粉末分布等。同时,反馈控制算法和系统的响应速度也有待提高,无法及时对制造过程中的异常情况进行调整和控制。

4) 激光增材制造零件的后处理技术有待发展。针对高端装备制造,激光增材制造后的零件通常需要进行后处理,如热处理、表面处理等,以改善零件性能和表面质量。然而,后处理工艺一般与具体的零件相关,对于不同的高端装备零部件,后处理工艺的选择和优化非常复杂,需要定制化开发适应于特定材料、零件结构和性能要求的后处理解决方案。尽管金属增材制造可以开展复杂内流道设计和制造,但针对大长径比复杂内流道的后处理技术仍然缺乏,甚至成为激光增材制

造复杂零件大规模推广应用的工业瓶颈问题。

考虑到激光增材制造过程中产生的残余应力会影响零件的尺寸精度和力学性能,残余应力消除也是后处理工艺的重点。但对于一些增材制造的高端装备大型结构零件,残余应力的消除非常困难^[72,75]。对于一些高端装备的复杂结构件,内应力的分布更加不均匀,容易导致零件变形、开裂等问题。如在高端装备制造领域高温合金应用较多,但是镍基高温合金在激光增材制造过程中普遍存在内应力问题,残余应力可能导致成形件发生开裂,严重影响零件的塑性和韧性,而对如何降低和消除内应力的研究还在不断探索中。目前的残余应力消除方法(如热时效、振动时效等)效果有限,且可能会对零件的性能产生一定的影响。

4 高端装备激光增材制造技术发展趋势

4.1 持续推动高端装备制造领域增材制造技术提高

随着技术体系成熟度的不断提高,激光增材制造技术在高端装备制造业获得了广泛的应用,显示出了巨大的市场潜力,但其发展受到诸多因素制约,仍然需要扩展材料种类、提高成形效率、革新质量控制手段、降低综合使用成本,亟需解决高端装备关键核心部件的极端尺寸、异型异质、梯度结构、多层多材料等高质量、低成本制造问题。面向规模化生产,需要完善激光增材制造材料、工艺稳定性控制方法与技术体系,突破质量性能一致性控制、检测和评价关键技术,形成激光增材制造典型材料关键力学性能许用值和数据库,开展批量工程应用。

在高端装备制造领域,激光增材制造技术的主要发展方向表现为大尺寸复杂结构零部件的整体精密成形和含精细特征的大型高性能复杂构件的快速构建。对于高端装备中的小尺度复杂精密零件,需要进一步提高增材制造的加工精度和成形效率。特别是具有外部形貌和内流道的精细零部件,进一步开发相适应的后处理工艺或者以增减交替加工的方式完成高端装备关键零件的批量增材制造。对于高端制造领域典型大尺度结构件制造,需要进一步攻关大型高性能复杂构件制造的工艺调控、在线质量检测、服役性能预测等,推动高端装备制造进一步突破已有设计的性能极限。

针对高端装备大尺寸零部件制造需求,需要进一步开发新型激光增材制造装备,开展集成多

工艺复合、增减材、增等材复合、成形过程在线监测和质量控制以及装备智能化技术研究^[76]。为突破大幅面激光粉末床装备一直增加激光数量而导致的技术发展瓶颈,可采用精密数控系统驱动少量激光器在大型粉末床上进行边移动边选区熔化成形,有望成为大型精细复杂零部件整体制造的一个可行解决方案。针对高端装备复杂构件高精制造和长寿命服役的需求,结合激光增材与焊接优势,开展集成“激光粉末床熔融、激光定向能量沉积、焊接”功能的一体化制造技术与装备研究。此外,针对高端装备的大型、超大型构件精密制造需求,开展多机器人协同增材制造装备、激光与电弧等多能场复合装备研究,如激光辅助固相增减材制造装备,开发万瓦级激光同轴多路熔丝增材制造装备、万瓦级激光丝材与粉末同送增材制造装备、智能化制造系统等也将是未来的发展趋势。

4.2 推动高端装备制造技术的颠覆性变革

高强薄壁构件(如高超声速飞行器舱体、运载火箭箭体、发动机尾喷管等)是某些高端装备最重要的主承载结构,这类薄壁构件多服役于严酷的热机械耦合环境。以高超声速飞行器舱体为例,需满足飞行气动加热、再入大气层、高机动过载、超远程巡航等服役条件,要求具备超强承载、极端耐热、超高精度、超轻量化等特性。传统的防热与承载功能独立、材料与结构分离、单一材料结构以及大量焊接的设计和制造模式限制了高端装备性能发挥,且面临结构减重和有效载荷提升的技术瓶颈。因此,基于增材制造技术,开发具有热控-承载-减振功能的跨尺度薄壁构件,有望成为高端装备领域高强薄壁构件制造的颠覆性技术。

基于增材制造技术,发展先进的材料-功能-结构一体化设计方法理论、突破多材料多尺度结构的整体制造技术瓶颈,发展多功能融合的超材料和超结构部件,如开发具有可变性特征的电磁/声学超材料结构、具有抗冲击-吸能可重构的复合结构、具有近零膨胀系数-减振的平台支架、复杂结构形状的纯铜电磁线圈、具有金属与陶瓷复合或多种金属复合的一体化结构,或者包含轻质高强母材及形状记忆合金的智能组合构件等。总之,激光增材制造技术有望推动高端装备领域颠覆性技术突破。

参考文献:

- [1] 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19-23.

- LU Bingheng. Additive Manufacturing Technology—Current Status and Future [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(1):19-23
- [2] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. *航空学报*, 2014, 35(10):2690-2698.
- WANG Huaming. Materials' Fundamental Issues of Laser Additive Manufacturing for High-performance Large Metallic Components[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10):2690-2698.
- [3] 王向明. 飞机新概念结构设计与工程应用[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(4):1-7.
- WANG Xiangming. New Concept Structural Design and Engineering Application of Aircraft [J]. *Aviation Science and Technology*, 2020, 31(4):1-7.
- [4] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5):32-55.
- GU Dongdong, ZHANG Hongmei, CHEN Hongyu, et al. Laser Additive Manufacturing of High-performance Metallic Aerospace Components [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5):32-55.
- [5] 张卫红, 周涵, 李韶英, 等. 航天高性能薄壁构件的材料-结构一体化设计综述[J]. *航空学报*, 2023, 44(9):627428-627428
- ZHANG Weihong, ZHOU Han, LI Shaoying, et al. Material-structure Integrated Design for High-performance Aerospace Thin-walled Component[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(9):627428-627428
- [6] 王磊, 卢秉恒. 我国增材制造技术与产业发展研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(4):202-211.
- WANG Lei, LU Bingheng. Development of Additive Manufacturing Technology and Industry in China [J]. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 2022, 24(4):202-211
- [7] 蒯腾飞, 宋浦, 姜炜, 等. 弹药战斗部增材制造技术研究现状与展望[J]. *火炸药学报*, 2023, 46(3):199-213.
- KUAI Tengfei, SONG Pu, JIANG Wei, et al. Research Status and Prospects of Additive Manufacturing for Warhead[J]. *Explosives and Propellants*, 2023, 46(3):199-213.
- [8] Defense and Munitions. Hypersonics and 3D printing: Velo3D, Martin Lockheed, and Vibrant Team up with DoD's LIFT Institute on a Data-driven Approach to Certifying Materials and Methods for Additively Manufactured Aerosystems[EB/OL]. (2023-09-12)[2024-12-09]. <https://www.defenseandmu-nitions.com/news/hypersonics-3d-printing-velo3d-lockheed-martin-vibrant-lift-dod/>.
- [9] 柯林达, 张小龙, 崔哲, 等. 面向增材制造的导弹结构优化设计综述[J]. *空天防御*, 2023, 6(2):28-34.
- KE Linda, ZHANG Xiaolong, CUI Zhe, et al. Review of Missile Structural Optimization Design for Additive Manufacturing [J]. *Aerospace Defense*, 2023, 6(2):28-34
- [10] 朱继宏, 何飞, 张卫红. 面向增材制造的飞行器结构优化设计关键问题[J]. *航空制造技术*, 2017(5):16-21.
- ZHU Jihong, HE Fei, ZHANG Weihong. Key Issues in Aircraft Structural Optimization Design for Additive Manufacturing [J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2017(5):16-21.
- [11] GONG Guanghao, YE Jiajia, CHI Yiming, et al. Research Status of Laser Additive Manufacturing for Metal: a Review [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 10(6):12074-12086.
- [12] WANG Tao, TANG Haibo, ZHU Yanyan, et al. Laser Additive Manufacturing of New $\alpha+\beta$ Titanium Alloy with High Strength and Ductility[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26(9):7566-7582.
- [13] LI Yi, WANG Zhenhong, XIAO Yuhang, et al. Review of Laser-metal Additive Manufacturing + X Hybrid Technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(13):629349.
- [14] JIMÉNEZ A, BIDARE P, HASSANIN H. Powder-based Laser Hybrid Additive Manufacturing of Metals: a Review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 159:103855.
- [15] CHOWDHURY S, YADAVIAH N, PRAKASH C, et al. Laser Powder Bed Fusion: a State-of-the-art Review of the Technology, Materials, Properties & Defects, and Numerical Modelling [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 11(8):1479-1497.
- [16] ZHU Zhiguang, HU Zhiheng, SEET Hangli, et al. Recent Progress on the Additive Manufacturing of Aluminum Alloys and Aluminum Matrix Composites: Microstructure, Properties, and Applications [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023, 160:104047.
- [17] LI Xinzhi, FANG Xuewei, JIANG Xiao, et al. Additively Manufactured High-performance AZ91D Magnesium Alloys with Excellent Strength and Ductility via Nanoparticles Reinforcement [J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 69:103550.
- [18] FAN Hongju, HU Jiaying, WANG You, et al. A

- Review of Laser Additive Manufacturing (LAM) Aluminum Alloys: Methods, Microstructures and Mechanical Properties[J]. *Optics and Laser Technology*, 2024, 136:110722.
- [19] TAN Chaolin, ZOU Ji, WANG Di, et al. Duplex Strengthening via SiC Addition and In-situ Precipitation in Additively Manufactured Composite Materials [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 236: 109820.
- [20] SONG Tingting, CHEN Zibin, CUI Xiangyuan, et al. Strong and Ductile Titanium-Oxygen-Iron Alloys by Additive Manufacturing[J]. *Nature*, 2023, 618:63-68.
- [21] 张纪奎, 孔祥艺, 马少俊, 等. 激光增材制造高强高韧 TC11 钛合金力学性能及航空主承力结构应用分析[J]. *航空学报*, 2021, 42(10):525430.
- ZHANG Jikui, KONG Xiangyi, MA Shaojun, et al. Laser Additive Manufacturing of High Strength and Toughness TC11 Titanium Alloy: Mechanical Properties and Application Analysis in Aircraft Primary Load-bearing Structures [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(10), 525430.
- [22] MARTIN J H, YAHATA B D, HUNDLEY J M, et al. 3D Printing of High-strength Aluminium Alloys[J]. *Nature*, 2017, 549:365-369.
- [23] LI Gan, ZHAO Chunlu, HUANG Yuye, et al. Additively Manufactured Fine-grained Ultrahigh-strength Bulk Aluminum Alloys with Nanostructured Strengthening defects[J]. *Materials Today*, 2024, 76:40-51.
- [24] LI Yan, FENG Zuying, HAO Liang, et al. A Review on Functionally Graded Materials and Structures via Additive Manufacturing: from Multi-scale Design to Versatile Functional Properties [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020,5(6):1900981.
- [25] MA Zongyu, LIU Weiwei, LI Wanyang, et al. Additive Manufacturing of Functional Gradient Materials: a Review of Research Progress and Challenges [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 971: 172642.
- [26] DEMUYNCK S, ROMBOUTS M, KRUTH J P, et al. Additive Manufacturing of Multi-material Structures[J]. *Materials Science & Engineering R*, 2018, 134:1-23.
- [27] ZHANG Jiahao, WANG Leilei, ZHAO Kai, et al. Thermal Analysis and Microstructure Evolution of TiC/Ti6Al4V Functionally Graded Material by Direct Energy Deposition [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 893 :146136.
- [28] TIAN Xiaoxiao, ZHAO Zhi, WANG Haibin, et al. Progresses on the Additive Manufacturing of Functionally Graded Metallic Materials [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 873:170687.
- [29] GHANAVATI R, NAFFAKH-MOOSAVY H. Additive Manufacturing of Functionally Graded Metallic Materials: a Review of Experimental and Numerical Studies [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 13:1628-1664.
- [30] KOKKINIS D, SCHAFFNER M, STUDART A R. Multimaterial Magnetically Assisted 3D Printing of Composite Materials [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1):8643.
- [31] 王晓强, 文世峰, 周燕, 等. 多材料增材制造研究现状及展望 [J]. *电加工与模具*, 2022(2):1-14.
- WANG Xiaoqiang, WEN Shifeng, ZHOU Yan, et al. Research Status and Prospects of Multi-material Additive Manufacturing [J]. *Electrical Processing and Mold*, 2022 (2):1-14.
- [32] LI Neng, LIU Wei, WANG Yan, et al. Laser Additive Manufacturing on Metal Matrix Composites: a Review [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34:38.
- [33] JIMÉNEZ A, BIDARE P, HASSANIN H, et al. Hybrid Laser Additive Manufacturing of Metals: a Review [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114, 63-96.
- [34] BAI Yunchao, LEE Yanjin, ZHAO Cuiling, et al. Unique Cellular Microstructure-enabled Hybrid Additive and Subtractive Manufacturing of Aluminium Alloy Mirror with High Strength [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 325:118095.
- [35] STAVROPOULOS P, BIKAS H, AVRAM O, et al. Hybrid Subtractive-additive Manufacturing Processes for High Value-added Metal Components [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111:645-655.
- [36] 高凯, 王振忠, 孔刘伟, 等. 基于增减材复合制造的中空离心叶轮工艺设计 [J]. *航空制造技术*, 2021, 64(12):72-79.
- GAO Kai, WANG Zhenzhong, KONG Liuwei, et al. Process Design of Hollow Centrifugal Impeller Based on Additive and Subtractive Composite Manufacturing [J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2021, 64 (12):72-79.
- [37] TAN Chaolin, LI Runsheng, SU Jinlong, et al. Review on Field Assisted Metal Additive Manufacturing [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023, 189:104032.
- [38] ZENG Chao, XUE Liutian, JIA Yun, et al. A Re-

- view of Additive Manufacturing of Metallic Materials Assisted by Electromagnetic Field Technology[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 131:920-946.
- [39] 高海瑞, 李继康, 张振武, 等. 多场调控金属激光增材制造研究现状与展望(特邀)[J]. *中国激光*, 2024, 51(10):1002306.
- GAO Hairui, LI Jikang, ZHANG Zhenwu, et al. Research Status and Prospect of Multi-field Modulated Metal Laser Additive Manufacturing (Invited) [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(10): 1002306.
- [40] YOON H, LIU P, PARK Y, et al. Pulsed Laser-assisted Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V for In-situ Grain Refinement [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12:21589.
- [41] LI Xuekai, WANG Wei, WU Yihong, et al. Ultrasonic Field-assisted Metal Additive Manufacturing (U-FAAM): Mechanisms, Research and Future Directions[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2024, 111: 107070.
- [42] WANG Linxin, WANG Lei, FENG Qingao, et al. High Surface Quality Additive Manufacturing Process of Titanium Alloy with Composite Heat Source [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2024, 238(1/2):37-47.
- [43] CHEN Y, ZHANG D, O'TOOLE P, et al. In situ Observation and Reduction of Hot-cracks in Laser Additive Manufacturing[J]. *Communications Materials*, 2024, 5:84.
- [44] GU Dongdong, SHI Xinyu, POPRAWA R, et al. Material-structure-performance Integrated Laser-metal Additive Manufacturing[J]. *Science*, 2021, 372:1487.
- [45] 周庆军, 严振宇, 张京京, 等. 航天运载器大型金属构件激光定向能量沉积研究及应用进展[J]. *中国激光*, 2024, 51(10):1002303.
- ZHOU Qingjun, YAN Zhenyu, ZHANG Jingjing, et al. Research and Application Progress of Laser Directed Energy Deposition on Large-scale Metal Components in Aerospace [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(10):1002303.
- [46] 倪江涛, 周庆军, 衣凤, 等. 激光增材制造技术发展及在航天领域的应用进展[J]. *稀有金属*, 2022, 46(10):1365-1382.
- NI Jiangtao, ZHOU Qingjun, YI Feng, et al. Development of Laser Additive Manufacturing Technology and Its Application Progress in Aerospace Field [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2022, 46(10): 1365-1382.
- [47] TAN Chaolin, WENG Fei, SUI Shang, et al. Progress and Perspectives in Laser Additive Manufacturing of Key Aeroengine Materials[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 170:103804.
- [48] 陈超越, 王江, 王瑞鑫, 等. 航空发动机及燃气轮机用关键材料的激光增材制造研究进展[J]. *科技导报*, 2023, 41(5):34-48.
- CHEN Chaoyue, WANG Jiang, WANG Ruixin, et al. Research Progress and Prospect of Additive Manufacturing of Key Materials for Aeroengines and Gas Turbines[J]. *Science & Technology Review*, 2023, 41(5):34-48.
- [49] COLORADO H A, CARDENAS C A, GUTIERREZ-VELAZQUEZ E I, et al. Additive Manufacturing in Armor and Military Applications: Research, Materials, Processing Technologies, Perspectives, and Challenges[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27:3900-3913.
- [50] CHEN Liangyu, LIANG Shunxing, LIU Y, et al. Additive Manufacturing of Metallic Lattice Structures: Unconstrained Design, Accurate Fabrication, Fascinated Performances, and Challenges[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2021, 146:100648.
- [51] BORIKAR G P, PATIL A R, KOLEKAR S B. Additively Manufactured Lattice Structures and Materials: Present Progress and Future Scope[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2023, 24:2133-2180.
- [52] MANTOVANI S, GIACALONE M, MERULLA A, et al. Effective Mechanical Properties of AlSi7Mg Additively Manufactured Cubic Lattice Structures[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2022, 9(4):326 - 336.
- [53] BARI K. Design, Simulation, and Mechanical Testing of 3D-printed Titanium Lattice Structures [J]. *Journal of Composites Science*, 2023, 7(1): 32.
- [54] CAIAZZO F, ALFIERI V, CAMPANELLI S L, et al. Additive Manufacturing and Mechanical Testing of Functionally-graded Steel Strut-based Lattice Structures[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 83:717-728.
- [55] OBADIMU S O, KOUROUSIS K I. Compressive Behaviour of Additively Manufactured Lattice Structures: a Review[J]. *Aerospace*, 2021, 8(8):207.
- [56] 宋波, 张磊, 王晓波, 等. 面向航空航天领域的增材制造超材料的研究现状及发展趋势[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(14):22-33.

- SONG Bo, ZHANG Lei, WANG Xiaobo, et al. Research Status and Development Trend of Additive Manufacturing Metamaterials for Aerospace [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(14):22-33.
- [57] FAN Junxiang, ZHANG Lei, WEI Shuaishuai, et al. A Review of Additive Manufacturing of Metamaterials and Developing Trends[J]. *Materials Today*, 2021, 50:303-328.
- [58] 吴文旺, 夏热. 轻质点阵超结构设计及多功能力学性能调控方法[J]. *力学进展*, 2022, 52(3):673-718. WU Wenwang, XIA Re. Design of Lightweight Lattice Meta-structures and Approaches to Manipulate Their Multi-functional Mechanical Properties [J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(3):673-718.
- [59] KORKMAZ M, GUPTA M, ROBAK G, et al. Development of Lattice Structure with Selective Laser Melting Process: a State of the Art on Properties, Future Trends and Challenges[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 81:1040-1063.
- [60] 任鑫, 张相玉, 谢亿民. 负泊松比材料和结构的研究进展[J]. *力学学报*, 2019, 51(3):656-689. REN Xin, ZHANG Xiangyu, XIE Yimin. Research Progress in Auxetic Materials and Structures [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(3):656-689.
- [61] BLAKEY-MILNER B, GRADL P, SNEDDEN G, et al. Metal Additive Manufacturing in Aerospace: a Review[J]. *Materials & Design*, 2021(12):110008.
- [62] MACONACHIE T, LEARY M, LOZANOVSKI B, et al. SLM Lattice Structures: Properties, Performance, Applications and Challenges[J]. *Materials & Design*, 2020, 189:108137.
- [63] LIU Jiayang, LI Shu. Efficient Phononic Band Gap Optimization in Two-dimensional Lattice Structures Using Extended Multiscale Finite Element Method [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2024, 67(9):1-23.
- [64] 张啸雨, 刘畅, 施丽铭, 等. 蒙皮点阵一体化支撑结构的移动可变形组件优化设计及空间站应用[J]. *固体力学学报*, 2022, 43(5):551-563. ZHANG Xiaoyu, LIU Chang, SHI Liming, et al. Optimization Design and Space Station Application of Mobile Morphable Component-based Skin-lattice Integrated Support Structure [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2022, 43(5):551-563.
- [65] 李家雨, 付宇彤, 李元庆, 等. 增材制造仿生结构的力学性能优化及其功能设计研究进展[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(9):4435-4456. LI Jiayu, FU Yuhong, LI Yuanqing, et al. Research Progress on Mechanical Performance Optimization and Functional Design of Additive Manufactured Biomimetic Structures [J]. *Acta Materialia Compositae Sinica*, 2024, 41(9):4435-4456.
- [66] KANISHKA K, ACHERJEE B. Revolutionizing Manufacturing: a Comprehensive Overview of Additive Manufacturing Processes, Materials, Developments, and Challenges[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 107:574-619.
- [67] GÜLER O V, GÜREL B, KURTULUŞ K, et al. Thermo-hydraulic Efficiency of Lung-inspired Compact Plate Heat Exchangers Made Using Additive Manufacturing Techniques with Steel, Aluminum and Titanium Powders [J]. *Chemical Engineering Science*, 2024, 283:119378.
- [68] 迟百宏, 刘家鑫, 陆宽, 等. 电磁隐身-水下隔声-超疏水减阻一体化超材料结构[C]//第三届航空航天增材制造大会优秀论文集. 北京: 航天科技创新研究院, 2023:6. CHI Baihong, LIU Jiabin, LU Kuan, et al. Integrated Metamaterial Structures for Electromagnetic Stealth, Underwater Acoustic Isolation, and Superhydrophobic Drag Reduction[C]//Proceedings of the 3rd Aeronautical and Astronautical Additive Manufacturing Conference. Beijing: Aerospace Science and Technology Innovation Institute, 2023:6.
- [69] YUAN Luhao, GU Dongdong, LIU Xin, et al. Design and Additive Manufacturing of Bionic Hybrid Structure Inspired by Cuttlebone to Achieve Superior Mechanical Properties and Shape Memory Function [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2024, 6:055001.
- [70] LIN Kaijie, YUAN Luhao, GU Dongdong. Influence of Laser Parameters and Complex Structural Features on the Bio-inspired Complex Thin-wall Structures Fabricated by Selective Laser Melting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019:267:34-43.
- [71] XIE Deqiao, LV Fei, YANG Youwen, et al. A Review on Distortion and Residual Stress in Additive Manufacturing [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2022, 1:100039.
- [72] 颜江涛, 郑雪鹏, 石张平, 等. 金属增材制造检测技术与质量控制研究进展[J]. *无损检测*, 2024, 46(9):90-100. YAN Jiangtao, ZHENG Xuepeng, SHI Zhangping, et al. Research Progress on Detection Technologies and Quality Control for Metal Additive Manufactur-

- ing [J]. *Nondestructive Testing*, 2024, 46(9): 90-100.
- [73] LEUNG C L A, MARUSSI S, ATWOOD R C, et al. In Situ X-ray Imaging of Defect and Molten Pool Dynamics in Laser Additive Manufacturing[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1):1355.
- [74] 汤海波, 吴宇, 张述泉, 等. 高性能大型金属构件激光增材制造技术研究现状与发展趋势[J]. *精密成形工程*, 2019, 11(4):58-63.
TANG Haibo, WU Yu, ZHANG Shuquan, et al. Research Status and Development Trends of Laser Additive Manufacturing Technology for High-performance Large-scale Metal Components[J]. *Precision Forming Engineering*, 2019, 11(4):58-63.
- [75] TIAN Xiaoyong, WU Lingling, GU Dongdong, et al. Roadmap for Additive Manufacturing: toward Intellectualization and Industrialization [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2022, 1(1):100014.
- [76] TIAN Xiaoyong, LI Dichen, LIAN Qin, et al. Additive Manufacturing of Integrated Micro/Macro Structures Driven by Diversified Functions-30 Years of Development of Additive Manufacturing in Xi'an Jiaotong University [J]. *Additive Manufacturing Frontiers*, 2024, 3(2):200140.
- (编辑 王艳丽)
-
- 作者简介:** 杨凯, 男, 1983年生, 正高级工程师。研究方向为先进工艺与成形、增材制造技术应用。E-mail: yangkai@861China.com。刘谋斌*(通信作者), 男, 1970年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为计算力学、流固耦合力学、工业软件与智能制造。E-mail: ynyn@pku.edu.cn。
- 本文引用格式:**
杨凯, 王磊, 汤永凯, 等. 面向高端装备的金属激光增材制造技术发展与应用[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(9):2068-2080.
YANG Kai, WANG Lei, TANG Yongkai, et al. Development and Applications of Metal Laser Additive Manufacturing Technology for High-end Equipment[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(9):2068-2080.
-
- (上接第2002页)
- [14] 严明康. 含水率对砂土似粘聚力的影响及工程应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
YAN Mingkang. The Effect of Water Content on Apparent Cohesion of Sand and Its Engineering Application[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [15] CHOPRA S, TOLLEY M T, GRAVISH N. Granular Jamming Feet Enable Improved Foot-ground Interactions for Robot Mobility on Deformable Ground [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(3): 3975-3981.
- [16] SCOTT G P, SAAJ C M. The Development of a Soil Trafficability Model for Legged Vehicles on Granular Soils [J]. *Journal of Terramechanics*, 2012, 49(3/4): 133-146.
- [17] 杨晋文. 土与结构接触面的离散元模拟与微观结构特性研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
YANG Jinwen. DEM Study on Soil-structure Interface and Its Microstructural Characteristics[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, 2019.
- [18] 王宪良, 钟晓康, 耿元乐, 等. 基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(23): 100-107.
- [19] 潘万竞. 基于离散元理论的月尘颗粒接触力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
PAN Wanjing. Research on Contact Mechanical Properties of Lunar Dust Particles Based on Discrete Element Method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- (编辑 王旻玥)
-
- 作者简介:** 张颖曦, 男, 2000年生, 硕士研究生。研究方向为六足机器人足地力学建模与仿真。E-mail: 460290958@qq.com。姜杰*(通信作者), 女, 1985年生, 副教授。研究方向为六足机器人结构设计及步态规划。E-mail: jiangjie13@cdut.edu.cn。
- 本文引用格式:**
张颖曦, 姜杰, 蒋刚, 等. 黏土环境下六足机器人抬腿阻滞力学模型研究[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(9):1996-2002.
ZHANG Haoxi, JIANG Jie, JIANG Gang, et al. Study on Mechanics Model of Leg Lift Retardation for Hexapod Robot in Clay Environment [J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(9): 1996-2002.