

·特邀综述·

光纤激光器在金属增材制造中的应用进展及展望

杨永强*, 吴世彪, 张越, 朱勇强

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641

摘要 光纤激光器具有光电转换效率高、以柔性介质传输激光、输出功率高、光束质量好、紧凑性和可靠性高等优点, 适合用作粉末床熔融和定向能量沉积这两种金属增材制造技术的热源。综述了上述两种增材制造技术中光纤激光器热源的应用情况, 包括光纤激光器的类型、输出功率、工作模式等, 并分别阐述了以光纤激光器作为热源的上述两种增材制造技术成形典型金属材料的研究现状。粉末床熔融和定向能量沉积成形件的致密度、力学性能均超过了传统铸件, 且接近锻件水平。最后对光纤激光器增材制造工艺的研究方向进行了展望, 并结合两种金属增材制造技术的发展需求, 对光纤激光器的发展进行了展望。

关键词 激光器; 增材制造; 粉末床熔融; 定向能量沉积

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0500012

Application Progress and Prospect of Fiber Laser in Metal Additive Manufacturing

Yang Yongqiang*, Wu Shibiao, Zhang Yue, Zhu Yongqiang

School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

Abstract Fiber lasers have the advantages of high photoelectric conversion efficiency, transmitting laser with flexible medium, high power output, high beam quality, high compactedness and reliability. They are especially suitable as heat sources for two types of metal additive manufacturing technologies: powder bed fusion (PBF) and directed energy deposition (DED). This paper reviews the types, output power, and operating modes of fiber laser heat sources in those two additive manufacturing technologies, and the PBF and DED research status of fabricating typical metal materials. The relative density and mechanical properties of specimen manufactured by PBF and DED are higher than that of traditional casting and close to the level of forging. Finally, the research direction of fiber laser additive manufacturing technology is prospected, and the development trend of fiber laser is prospected according to the demand from those two kinds of metal additive manufacturing technology.

Key words lasers; additive manufacturing; powder bed fusion; directed energy deposition

OCIS codes 060.3510; 350.3390; 140.3070; 010.3310; 140.3295

1 引言

增材制造工艺(3D打印)依据待加工零件CAD模型切片数据,通过逐层叠加成型的方式,完成零件的构建。相对于传统的车削、铣削、刨削、磨削等减材制造工艺,增材制造工艺具有定制化能力强、供应链短、交货周期短、材料节约、成形件集成度高、可成

形具有复杂内腔及多孔结构件等优点^[1-5]。宏观上,增材制造工艺可分为粘接剂喷射、定向能量沉积、材料挤出、材料喷射、粉末床熔融、薄片叠层和立体光固化。采用不同类型的增材制造工艺可以成形不同的金属、陶瓷、聚合物和复合物^[6]。金属材料的增材制造工艺在航空、航天、航海、车辆、模具制造、医疗器械等领域的需求巨大。金属增材制造工艺的必要

收稿日期: 2020-03-31; 修回日期: 2020-04-15; 录用日期: 2020-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(51875215, 51705160)、中央高校基本科研项目(2019MS060)、广东省科技计划项目(2017A030313271, 2017B090911014, 2018B090905001)、广州市科技计划项目(201704030097)

* E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn

要素包括:持续的材料分配和稳定的高能热源。目前,应用于金属增材制造工艺的热源有激光束、电子束、微束等离子三大高能束及烧结热输入等^[7],其中的激光束是金属增材制造领域应用最广泛的高能束热源。与电子束、微束等离子热源相比,激光束具有光斑细、成本低、可定向作用到指定材料位置等优点,可实现金属材料的瞬间熔凝,满足熔道搭接和零件成形的要求。

金属增材制造工艺包括粘接剂喷射、粉末床熔融、薄材叠层和定向能量沉积等。粘接剂喷射是近几年的研究热点,其以烧结热输入为热源,采用多步工艺(粘接成形、高温烧结)快速成形出金属、陶瓷、复合物等材料零件^[8-9]。薄材叠层也采用多步工艺(叠层成形、高温烧结)成形金属材料,但其工艺复杂,成形精度难以控制^[10];粉末床熔融技术经历了从初期的激光选区烧结(SLS)和立体光固化(SLA)到后期的激光选区熔化(SLM)的发展过程^[11]。20世纪80年代中期到90年代初的研究热点为激光选区烧结。1986年,美国德克萨斯大学的 Deckard 率先使用 100 W 的 Nd:YAG 激光器实现了 ABS 聚合物的激光选区烧结成形。DeskTop 和 EOS 公司先后于 1992 年和 1994 年成功推出了配备 50 W CO₂ 激光器的激光选区烧结商业化装备 Sinterstation 2000 和 EOSINT(P)350。在激光选区烧结研究的基础上,德国 Fraunhofer 协会联合 EOS 公司针对激光选区熔化技术及装备进行了研发。1994 年,德国 Fraunhofer 协会率先实现了 316L 不锈钢的激光选区熔化成形;1995 年,EOS 公司率先成功开发出配备 100 W CO₂ 激光器的商业化装备 EOSINT M 250;21 世纪初期,Arcam 等公司开发了采用电子束作为热源的粉末床熔融装备。近些年,新一代具有高功率密度和良好光束质量(光束质量因子 M^2 接近 1.0)的掺镱光纤激光器成为激光选区熔化系统的新选择^[12]。定向能量沉积技术是由 20 世纪 70 年代末提出的激光熔覆技术发展而来的^[13-14]。1983 年,Weerasinghe 等对该技术进行了最初的探索^[13];20 世纪 90 年中期,Kosh、Lewis、Kreutz 等探索研究了应用 CO₂ 激光器等定向能量沉积的可行性^[13];1998 年,Keicher 等率先开发出采用 Nd:YAG 固体激光器的增材制造系统^[13];之后,美国的 ADDITEC、德国的 DMG Mori 和 TUMPF、西班牙的 Meltio 等公司先后推出了各自的商业化激光定向能量沉积设备。特别地,新一代高功率激光器如掺镱光纤激光器、半导体激光器

逐渐取代了传统的 CO₂ 激光器和 Nd:YAG 激光器,成为定向能量沉积系统的优选光源。

金属增材制造工艺的典型激光器有掺镱光纤激光器、Nd:YAG 固体激光器、半导体激光器和传统的 CO₂ 激光器。其中,光纤激光器是一种以掺稀土元素的光纤为增益介质的特殊的固体激光器,可输出位于近红外、中红外波段的激光。与传统其他激光器相比,光纤激光器具有以下优势^[15-19]:1)以固有的柔性介质产生和传输激光,使得激光更容易传输到聚焦位置和目标上;2)采用激光二极管泵浦,光电转换效率高;3)表面积体积比大,冷却效率高,支持 100 kW 级的连续输出功率;4)光束质量高;5)采用调 Q 和锁模技术支持超短脉冲激光工作;6)与相同功率的气体激光器和传统的 Nd:YAG 固体激光器相比,光纤可以弯曲和盘绕,更紧凑,振动稳定性更高,寿命更长,成本更低。另外,Nd:YAG 固体激光器是一种以棒状 Nd:YAG 晶体作为固体增益介质的固态激光器,具有以下特点^[20]:1)传统的 Nd:YAG 高功率激光器采用氙灯泵浦,光电转换效率较低,但采用激光二极管泵浦的 Nd:YAG 激光器弥补了这一不足;2)可以在连续和脉冲模式下工作,具有良好的超短脉冲激光性能;3)可采用柔性光纤传输光束,光束易传输到聚焦位置和目标上;4)紧凑度不如光纤激光器高;等等。

本文重点介绍了粉末床熔融和定向能量沉积增材制造工艺中光纤激光器热源的应用情况、激光工艺参数特点,以及典型金属材料的成形性能;围绕增材制造领域的需求,对光纤激光器在增材制造领域的发展趋势进行了展望。

2 光纤激光器在粉末床熔融增材制造中的应用

粉末床熔融(PBF)是增材制造中的一类重要工艺,是通过热能熔化/烧结粉末床上材料的增材制造工艺^[6],其典型系统如图 1(a)所示。粉末床熔融技术发展自 20 世纪 80 年代中后期的激光选区烧结(SLS)和立体光固化技术(SLA),随后逐渐过渡到激光选区熔化阶段。激光选区烧结采用激光熔化部分粉末或中间组分粉末来实现金属件、非金属件固态的粘接成形过程,成形件的致密度不高,故通常需要配合使用脱脂烧结、渗透致密等后处理工艺。随着光纤激光器、激光二极管泵浦 Nd:YAG 高功率密度激光器的发展,激光选区熔化完成了针对金属粉末材料的快速熔凝结合,实现了接近 100%致密度零件的一站式直接增材成形。

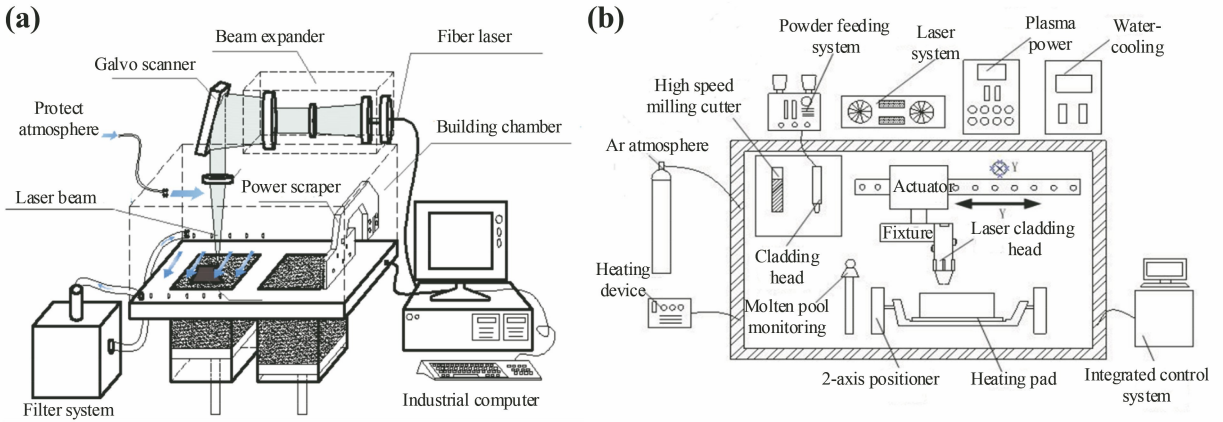


图 1 激光金属增材制造典型系统原理图。(a)粉末床熔融增材制造系统;(b)定向能量沉积增材复合制造系统
Fig. 1 Schematics of two typical laser additive manufacturing system for metal. (a) Powder bed fusion additive manufacturing system; (b) directed energy deposition additive and subtractive composite manufacturing system

如表 1 所示,典型的粉末床熔融工艺有激光选区熔化、激光选区烧结以及电子束选区熔化三种。其中:激光选区烧结^[21]多采用波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的红外 CO_2 激光器作为烧结热源,将粉末材料烧结成增材制造实体,具有成形速度快、精度高等特点,加工材料多为聚合物粉末;电子束选区熔化^[22]采用高能电子束作为热源,成形速度快,成形热应

力小,可成形高熔点材料和脆性材料,但仍存在电子束焦斑较大、制件粗糙度较低、成本过高等不足,从而限制了它的应用范围;激光选区熔化^[23]采用 $1\ \mu\text{m}$ 左右的红外激光束作为热源,可以直接制造高精度、具有良好性能的诸多金属零件,弥补了其他两种粉末床熔融技术的不足,成为近年来增材制造领域的研究热点。

表 1 粉末床熔融的分类及比较

Table 1 Classification and comparison of powder bed fusion

Method	Activation source	Forming speed	Forming accuracy	Main material type
Selective laser melting	Laser	Slow	High	Metal
Selective laser sintering	Laser	Fast	High	Polymer
Electron beam selective melting	Electron beam	Fast	Low	Metal

2.1 国内外激光选区熔化增材制造装备中光纤激光器的应用情况

激光选区熔化技术成形不同金属粉材的需求与其配备的激光器热源的类型及参数密切相关。激光选区熔化技术对激光器的需求体现在中心波长、光束质量、平均功率及连续/脉冲工作模式四个方面。激光光源的中心波长与特定材料的有效吸收率密切相关。文献^[24-25]表明,不同的粉末材料对激光辐射的吸收系数与激光波长密切相关;金属和碳化物粉末对激光的吸收系数随波长的增加而减小,而氧化物和聚合物粉末对激光的吸收率则随着波长的增加而增加。特别地,在掺镱光纤激光器和 Nd:YAG 激光器的 $1064\ \text{nm}$ 波段,不锈钢、纯铁、钼等金属对激光的吸收率可达 30% ,铜、铝、金、银等的吸收率则低于 5% ;而在 CO_2 激光器的 $10.6\ \mu\text{m}$ 波段,纯铁、不锈钢对激光

的吸收率不超过 10% ,其他金属如铜、铝、金、银的吸收率不超过 1% 。

激光器的平均输出功率及光束质量决定了激光束的输出强度(功率密度)。与光束参数积类似,光束质量因子 M^2 是衡量激光光束质量的常用指标,该指标为激光束的光束参数积与同波长衍射极限高斯光束的光束参数积之比,可用来衡量不同类型激光器的光束质量。光纤激光器和激光二极管泵浦 Nd:YAG 的光束质量因子接近 1 ,比 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长 CO_2 激光器的光束质量因子低很多^[26]。相同平均输出功率的光纤激光器和 Nd:YAG 激光器的输出强度远大于 CO_2 激光器。此外,光纤激光器具有柔性传输、高电光效率、低维护成本等优点,这些优点使其成为粉末床熔融增材类激光选区熔化工艺的首选。光纤激光器原理及掺镱光纤的吸收发射谱如图 2 所示。

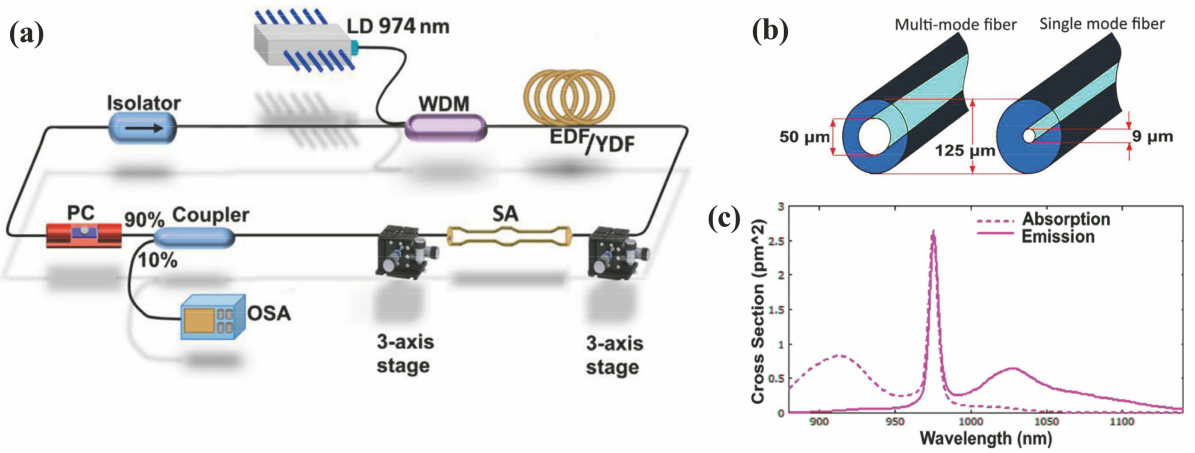


图 2 光纤激光器原理及掺镱光纤^[19]。(a) 光纤激光器系统；(b) 单模及多模光纤；(c) 掺镱光纤的吸收谱和发射谱
 Fig. 2 Fiber laser principle and ytterbium-doped fiber^[19]. (a) Fiber laser system; (b) single-mode and multi-mode optical fibers; (c) absorption and emission spectra of ytterbium-doped fiber

激光选区熔化成形过程依托的是激光的热效应,因此其更关注激光器平均输出功率及光束质量决定的能量密度(以实现不同材料的顺利熔凝和满足稳定成形的工艺窗口需求),而对激光器的脉冲模式不敏感。目前,国内外主流激光选区熔化增材制造装备基本上采用掺镱连续光纤激光器,激光器的功率分布在 70 W~1 kW 之间。1 kW 连续光纤激光器足可以成形不锈钢、马氏体不锈钢、Ti6Al4V、Ni718 高温合金、AlSi10Mg、CoCr 合金等金属材料。激光选区熔化增材制造装备的成形尺寸介于 50 mm×50 mm×80 mm~750 mm×750 mm×500 mm 之间。通常情况下,受振镜幅面及成形速度的限制,单光纤激光器的成形区域在 400 mm×400 mm 以内,因此大幅面装备需要 2~4 组光纤激光器及振镜模块搭接完成。国内外主要的激光选区熔化增材制造装备参数见表 2。

2.2 激光选区熔化粉末床熔融增材制造工艺的研究现状

激光选区熔化增材制造的研究现状可以从传统粉末材料成形、数字化材料及结构成形两个方面来描述。

1) 在传统粉末材料的激光选区熔化成形方面。光纤激光器所特有的高功率密度和良好的光束质量等特点,使激光选区熔化成形具有光斑小、能量密度高等特点,几乎可以直接成形任意复杂结构且具有冶金结合、组织致密、力学性能良好的金属零件^[27]。典型的激光选区熔化成形过程如图 3 所示。目前,国内外研究人员已经针对激光选区熔化工艺成形均

质传统材料进行了大量研究。激光选区熔化工艺所需的粉末材料主要包括青铜基合金、铁基合金、CoCr 基合金、钛基合金、铝基合金、镍基合金等^[28-40],而目前市场上应用得最多的则是模具钢、316L 不锈钢、马氏体钢、CoCr (Mo) 合金钢和 Ti6Al4V 等。科研型材料主要包括陶瓷材料、铁基混合粉末、纯钨、WC-Co 混合粉末等。研究表明:激光选区熔化成形金属材料的致密度可达到 95% 以上,甚至近乎 100%,尺寸精度为±0.05 mm,表面粗糙度 R_a 在 10~20 μm 范围内,力学性能一般高于铸件,可与铸锻件的性能相媲美^[28-40]。纯铜材料对 1 μm 红外激光有很高的反射率,为了保证纯铜成形过程中能量输入的稳定性,通常使用高功率密度红外光纤激光器作为光源,但高反射率会对设备的光学器件造成一定损伤^[41]。因此,使用 1 μm 红外光源的激光选区熔化技术成形纯铜等高反射率材料仍存在一定困难。

2) 在数字化材料及结构的激光选区熔化成形方面。目前,国内外的设备厂家与科研院所已将多种材料的成形作为激光选区熔化的一个方向,而且已有研究人员针对多种材料的送粉方式、不同材料之间的结合特性进行了初步研究,但目前的研究还停留在简单方块的多种材料成形上。基于激光选区熔化的多种材料结构性能一体化增材制造基础研究,涉及零件的材料构成、几何特征、材料本体、微观结构单元物理属性及激光选区熔化成形工艺,具体的研究内容包括数字化材料、数字化结构的成形工艺以及典型应用。

表 2 国内外激光选区熔化设备及参数

Table 2 Equipment and parameters of domestic and foreign SLM manufacturers

Company	Model	Build volume / (mm×mm×mm)	Laser power /W	Laser type	Material
SLM solution (GER)	SLM [®] 125	125×125×125	400	IPG fiber laser /CW	Stainless steel, Ti6Al4V, AlSi10Mg, IN718, etc.
	SLM [®] 500	500×280×365	2×400 2×700		
Concept Laser/GE Additive(USA)	Mlab Cusing	50×50×80	100	Fiber laser /CW	Stainless steel, titanium alloy, aluminum alloy, etc.
		70×70×80			
		90×90×80			
DMG MORI (USA)	LASERTEC 12 SLM	245×245×350	400	Fiber laser /CW	Stainless steel, titanium, aluminum or tool steel, etc.
		245×245×350	2×400		
		300×300×300	600		
		300×300×300	1000		
EOS(GER)	EOS M 100	φ100×95	200	Yb fiber laser /CW	Stainless steel, titanium-based alloys, AlSi10Mg, IN718, etc.
		250×250×325	400		
		300×300×400	400		
		300×300×400	1000		
		400×400×400	1000		
Renishaw (UK)	RenAM 500	250×250×350	500	Fiber laser /CW	Stainless steel, titanium alloy, aluminum alloy, etc.
Bright Laser Tech (CHN)	BLT-A100	100×100×100	200	Fiber laser /CW	Titanium alloy, aluminum alloy, nickel-based alloy, stainless steel, etc.
		250×250×300	500		
		400×250×400	2×500		
FarsoonTech (CHN)	FS121M	120×120×100	200	Fiber laser /CW	316L, CoCrMoW, CoCrMo, CuSn10, IN625, IN718, etc.
		275×275×340	500		
		425×425×420	500 2×500		
Laseradd(CHN)	DiMetal-100	100×100×100	200	Yb fiber laser /CW	Stainless steel, cobalt chromium alloy, Ti6Al4V, AlSi10Mg, IN718, etc.
		250×250×300	500		
		500×250×300	2×500		

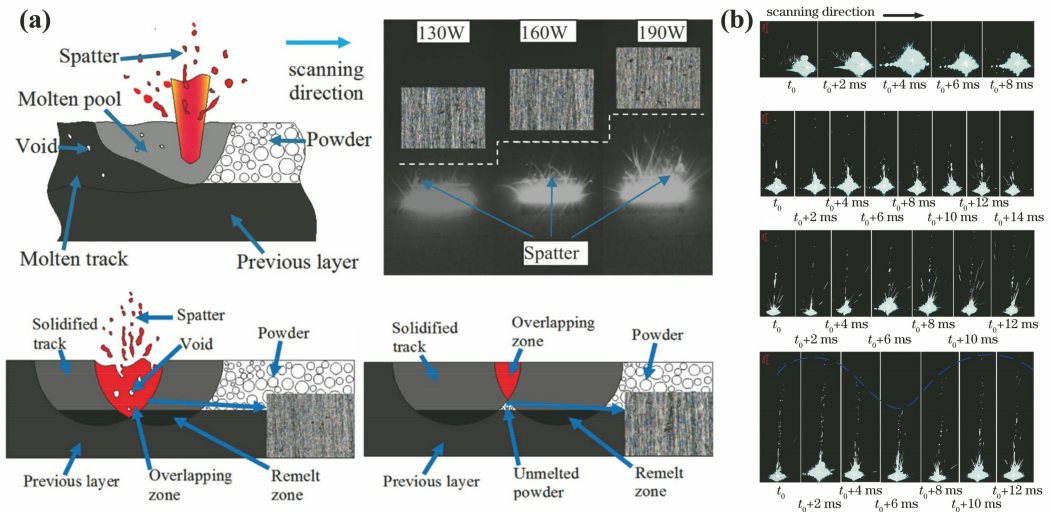


图 3 激光选区熔化成形过程^[39-40]。(a)熔道搭接成形及缺陷形成机理；(b)熔池及飞溅信息

Fig. 3 Process of selective laser melting forming^[39-40]. (a) Mechanisms of melting track overlap forming and defects formation; (b) melting pool and spatter information

数字化材料主要包括从单质材料到合金材料、从合金材料到梯度及复合材料的新型功能材料。在数字化材料的激光增材直接成形过程中,通过改变通入的气体种类、供气量及粉末材料种类的数字化配备关系,结合激光原位合成原理,就可在零件预定位置获得具有高强度、高硬度的增强相,使零件整体

达到预设的力学性能。数字化结构就是对零件结构整体或局部进行基于性能的单元体替代及拓扑优化,改变传统零件的均质要求,实现结构性能的一体化。华南理工大学团队已在激光选区熔化成形数字化材料及结构方面开展了一些研究^[42-45],研究结果如图4所示。

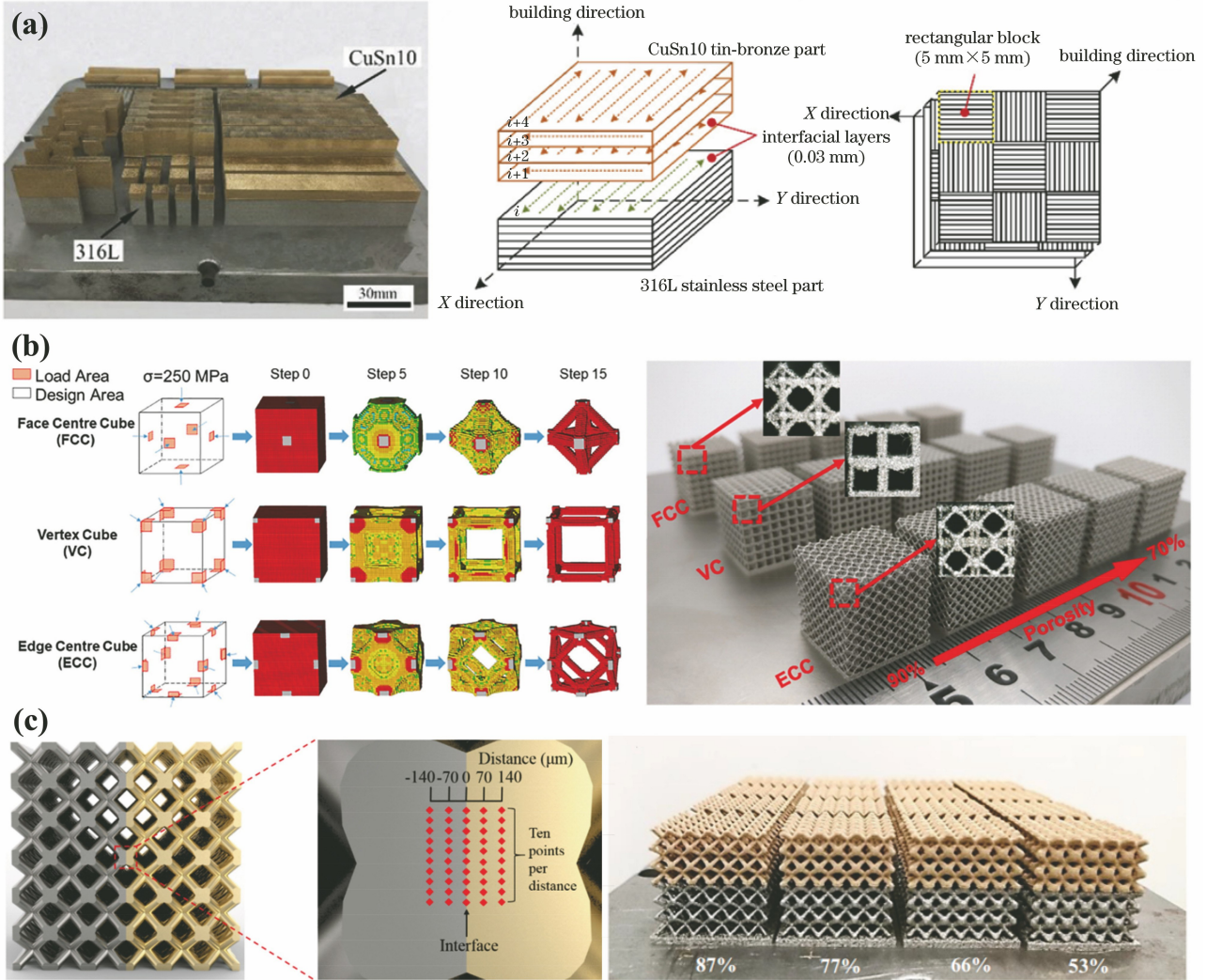


图4 几种典型的数字化材料及数字化结构样件^[43-45]。(a) 316L/CuSn10 双金属结构; (b) 316L 拓扑优化 FCC/VC/ECC 晶格类型多孔结构; (c) CuSn-18Ni300 双金属梯度多孔结构

Fig. 4 Several typical digital materials and digital structure samples^[43-45]. (a) 316L/CuSn10 bimetal structure; (b) 316L topology optimization of FCC/VC/ECC lattice type porous structures; (c) CuSn-18Ni300 bimetallic gradient porous structure

3 光纤激光器在定向能量沉积中的应用现状

定向能量沉积(DED)是金属增材制造的一种代表性技术,它利用聚焦的热能同步熔化输送的粉末状或丝状材料,按照预设的轨迹进行逐层零件制造或单层熔覆、修复^[6,46],其典型系统如图1(b)及图5(b)所示。与粉末床熔融增材制造相比,定向能

量沉积金属增材制造的成形范围更大,生产率更高,将其与传统的铣削等减材工艺结合能够制造出满足航空航天领域要求的大型零部件。但是,定向能量沉积的成形精度不及粉末床熔融增材制造。定向能量沉积技术按材料供给方式可分为送粉式和送丝式两大类^[47],其中,送粉式和送丝式定向能量沉积所使用的热源有激光束、电子束、等离子束三种,如图5所示。与以等离子束为热源的定向能量沉积技术相比,

以激光和电子束为热源的定向能量沉积技术的成形精度更高。此外,以光纤激光器作为热源不仅具有成本低、能量高的特点,而且便于激光头灵活移动,方便

装备的集成设计和生产^[47]。国内外厂商及科研单位多采用送粉式结合光纤激光器、送丝式结合光纤激光器的模式进行定向能量沉积增材制造装备的研发。

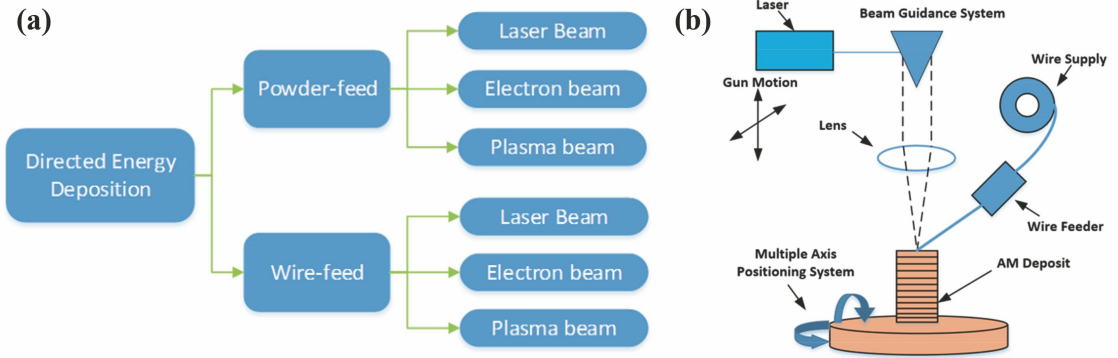


图 5 定向能量沉积技术^[10,47]。(a)定向能量沉积技术分类;(b)送丝式定向能量沉积系统

Fig. 5 Directed energy deposition technology^[10,47]. (a) Classification of directed energy deposition technology; (b) wire-feed directed energy deposition system

目前,国内外定向能量设备主要以激光作为热源,以电子束和等离子弧作为热源的相对较少^[47-52]。国内方面:华南理工大学搭建了以等离子作为热源的定向能量沉积增材制造平台^[49];北京航空制造工程研究所^[51]搭建了以电子束作为热源的增材制造平台。国外方面:英国 Kazanas 等^[52]搭建了一款电弧增材制造系统;美国 Sciaky 公司推出了以电子束为热源的 EBAM 系列增材制造设备^[47]。

3.1 国内外定向能量沉积增材制造设备中光纤激光器的应用情况

当前的定向能量沉积系统主要采用激光器作为热源。不同于光纤激光器在粉末床熔融工艺上广泛使用的局面,定向能量沉积对激光器的需求,在很多

方面与激光选区熔化技术(如激光器的中心波长)类似,但也有其自身的特点:定向能量沉积技术的成形范围及成形速度远大于激光选区熔化技术,因此为了满足不同类型粉材及丝材顺利熔凝直接成形的工艺窗口,要求激光束的光斑尺寸更大、输出功率更高。在送粉和送丝方式的定向能量沉积方面,虽然新一代高功率激光器如掺镱光纤激光器、半导体激光器、激光二极管泵浦 Nd:YAG 激光器逐渐取代了传统的 CO₂ 激光器和闪光灯泵浦 Nd:YAG 激光器,成为了定向能量沉积系统的优先光源,但目前仍有许多高功率 Nd:YAG 激光器、甚至是大功率 CO₂ 激光器在定向能量沉积系统中使用。4 类典型高功率激光器的参数如表 3 所示。

表 3 定向能量沉积增材制造领域的 4 种典型激光器^[53]

Table 3 Four typical laser in directed energy deposition additive manufacturing field^[53]

Laser parameter	CO ₂ laser	Nd:YAG laser	Fiber laser	Semiconductor laser
Wavelength / μm	10.06	1.06	1.07	0.8–0.98
Efficiency /%	5–20	LP: 1–3 DP: 10–20	10–30	30–60
Operation mode	CW & pulse	CW & pulse	CW & pulse	CW & pulse
Output power /W	Up to 20000	Up to 16000	Up to 10000	Up to 4000
Pulse energy/ pulse duration	1–10 J/100 ns–10 μs ,	Up to 120 J/1–20 ms,	Up to 15 J/0.2–20 ms,	Single diode,
Peak power	1 J/~100 ns	1.2 J/~3 ns	~mJ/40–500 ns	$\mu\text{J}/100\text{ ns}$ (50 kHz)
Beam quality factor / (mm·mrad)	Tens MW	50 MW	10 MW	40 W
Fiber delivery	3–5	0.4–20	0.3–4	10–100
Maintenance periods	Not possible	Possible	Possible	Possible
	2000 h	200 h (lamp life)	Maintenance free, pump diode life is about 100000 h	Maintenance free, pump diode life is about 100000 h

在激光定向能量沉积装备技术研发领域,国内外诸多研究团队、公司开展了卓有成效的研发活动。国内方面:北京航空航天大学王华明院士团队在钛合金、超强合金钢、镍基高温合金、不锈钢、难熔合金等材料的激光定向能量沉积装备、工艺、组织及性能方面进行了大量研究,并实现了激光定向能量沉积成形钛合金、超强合金钢等高性能大型金属结构件的装机工程应用^[54];西安铂力特增材技术股份有限公司的激光定向能量沉积装备在航空领域实现了成功应用。国外方面:美国桑迪亚国家实验室的 Keicher 等^[55-57]率先研发出第一台采用 Nd:YAG 固体激光器的定向能量沉积类 LENS 增材制造系统。在商业化激光定向能量沉积装备领域,美国 OPTOMECH 公司的装备研发占据国际领先地位,其

推出的 LENS Systems 系列装备可实现高速高质量的金属零件成形。此外,美国 ADDITEC、韩国 InssTek、德国 DMG Mori 和 TUMPF、西班牙 Meltio 等公司也推出了各自的激光定向能量沉积设备。国内外采用激光器为热源的定向能量沉积制造系统的设备型号及其激光器热源参数如表 4 所示,可见,半数以上的定向能量沉积设备厂商选择使用连续光纤激光器作为热源,比较少的定向能量沉积设备采用半导体激光器和固体激光器。用于激光定向能量沉积的光纤激光器的功率分布在 200 W~10 kW 范围内。因为光纤激光器的激光束功率高、光束质量好,可以大幅改善加工质量,且柔性传输便于集成,因此光纤激光器成为了定向能量沉积增材制造设备的主流热源。

表 4 国内外定向能量沉积设备及所用激光器

Table 4 Directed energy deposition equipment and lasers used at home and abroad

Equipment manufacturer	Equipment model	Laser power /kW	laser type
OPTOMECH(USA)	LENS systems series	0.4-3	Fiber laser/CW
ADDITEC(USA)	μPrinter	0.6	Semiconductor laser
InssTek(KR)	MX series	0.3-5	Yb fiber laser/CW
DMG MORI(GER)	LASERTEC 65 3D	2.5,3	Fiber laser/CW
TRUMPF (GER)	TruPrint series	0.2-0.5	Fiber laser/CW
Meltio (ESP)	M450	0.6	Solid state laser/CW
Bright Laser Technologies(CHN)	BLT-C600	1,2,4	Fiber laser/CW
	BLT-C1000	2,4,6	Fiber laser/CW
TSC(CHN)	TSC-S series	10	Fiber laser/CW
AFS(CHN)	AFS-D600	1-3	Fiber laser/CW
RAYCHAM(CHN)	RC-LDM2020	0.5-4	Fiber laser/CW
yNAMT(CHN)	YLC-500	2-4	Semiconductor laser
TIANYU(CHN)	TY3Z-201703	10	Fiber laser/CW
Laser Add(CHN)	Laseradd-PR-500	6	Fiber laser/CW
	Laseradd-DED-500H	1.5	Semiconductor laser

3.2 光纤激光器定向能量沉积增材制造工艺研究现状

在激光定向能量沉积增材工艺的研究方面,美国桑迪亚国家实验室的 Keicher 等^[55-57]率先对 LENS 成形金属件的优化工艺及组织性能演变进行了初步研究;之后,国内外围绕典型金属材料的光纤激光器定向能量沉积增材制造工艺进行了大量研究,得到的合金、不锈钢、金属玻璃复合材料、多层材料等典型材料的成形件如图 6 所示^[58-71]。研究结果表明:通过优化定向能量沉积工艺的扫描速度、激光功率、进给速度及扫描策略,最终成形出的钛合金、镍基合金、316L 不锈钢、304 奥氏体钢等典型材料的力学性能优于铸造材料,并接近于锻造件,且定向

能量沉积成形件与粉末床熔融成形件具有类似的力学性能。但是,定向能量沉积成形件的疲劳性能相比锻造件较差,结合后处理工艺,如热等静压处理和热处理,能有效愈合定向能量沉积成形件的内部孔隙及孔洞缺陷,显著提高成形件的抗疲劳性能(但是屈服强度和抗拉强度会降低)。在各向异性方面,定向能量沉积成形件同激光粉末床熔融成形件一样具有明显的各向异性。但由于定向能量沉积通常具有更粗的熔道和更厚的层厚,熔道间的搭接程度更低,所以成形件的各向异性相比后者更高。此外,定向能量沉积还可用于 AlSi10Mg 合金、NiTi 合金、高熵合金、Inval 合金、锆基块体金属玻璃复合材料以及异种多层材料的增材成形^[67-71]。

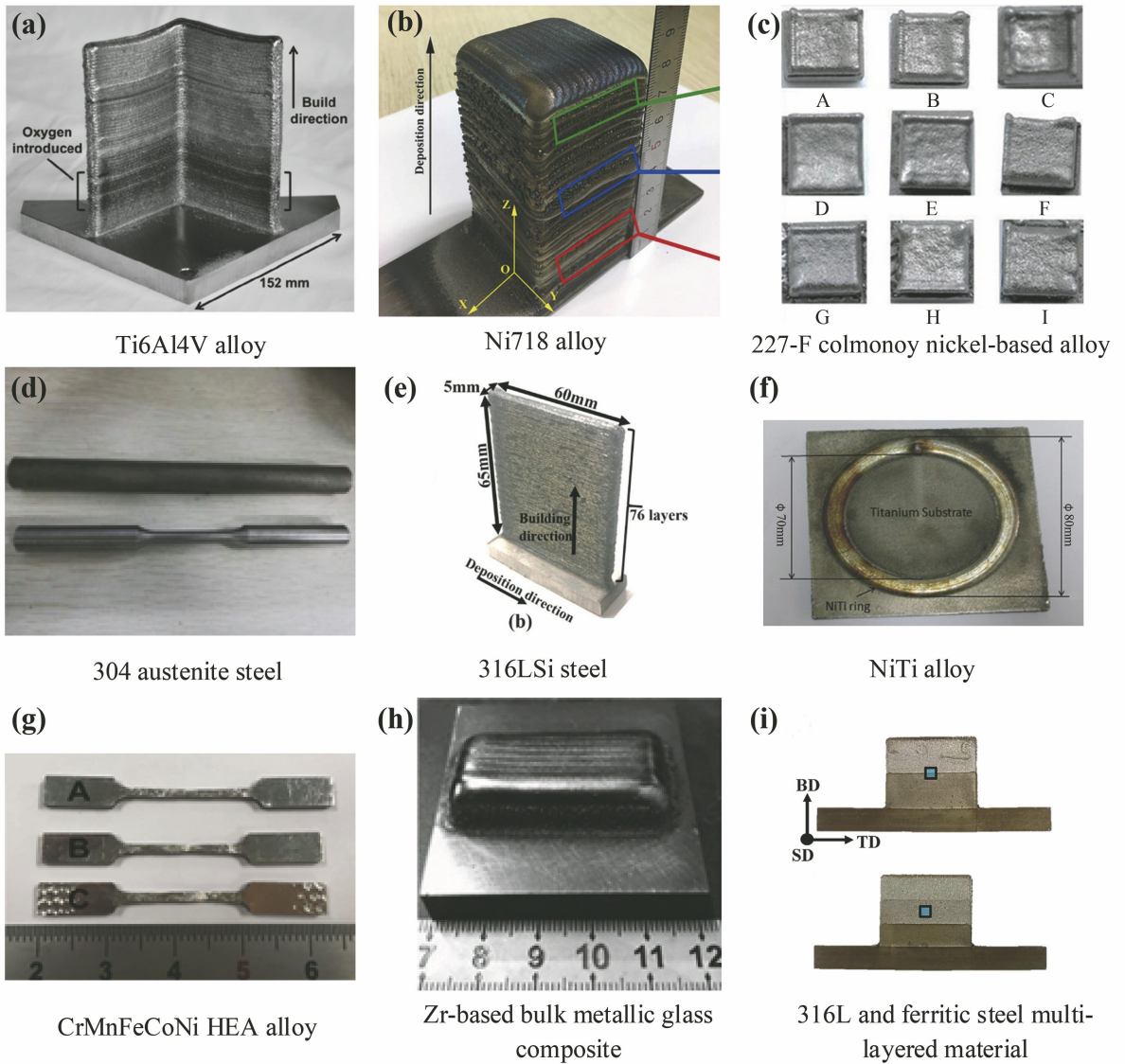


图 6 光纤激光器定向能量沉积典型材料成形件。(a) Ti6Al4V 合金^[58]；(b) Ni718 合金^[61]；(c) 227F colmonoy 镍基合金^[62]；(d) 304 奥氏体不锈钢^[63]；(e) 316LSi 不锈钢^[66]；(f) NiTi 合金^[67]；(g) CrMnFeCoNi 高熵合金^[68]；(h) 锆基块体金属玻璃复合材料^[69]；(i) 316L 不锈钢+铁素体钢多层材料^[65]

Fig. 6 Typical materials samples deposited by directed energy deposition with fiber laser. (a) Ti6Al4V alloy^[58] ; (b) Ni718 alloy^[61] ; (c) 227-F colmonoy nickel-based alloy^[62] ; (d) 304 austenite steel^[63] ; (e) 316LSi stainless steel^[66] ; (f) NiTi alloy^[67] ; (g) CrMnFeCoNi high-entropy alloy^[68] ; (h) Zr-based bulk metallic glass composite^[69] ; (i) 316L stainless steel and ferritic steel multi-layered material^[65]

4 结束语

光纤激光器适合作为粉末床熔融和定向能量沉积这两类金属增材制造工艺的热源。在激光粉末床熔融方面，国内外的主流激光选区熔化装备采用掺镱连续光纤激光器，其功率分布在 70 W~1 kW 之间。由于振镜幅面及成形速度的限制，单光纤激光器可成形的区域在 400 mm×400 mm 以内，大幅面装备需要 2~4 组激光器及振镜模块搭接完成。在

激光定向能量沉积系统方面，国内外主流增材制造装备大多采用掺镱连续光纤激光器，其功率通常为 200 W~10 kW。激光选区熔化和激光定向能量沉积增材制造技术非常适用于成形 316L 不锈钢、马氏体不锈钢、Ti6Al4V、Ni718 高温合金、AlSi10Mg、CoCr 合金等材料，成形件的致密度、力学性能均超过传统铸件并接近锻造件水平。

国内外学者针对典型均质金属材料的激光增材成形进行了充分研究，但对数字化材料及数字化结

构等功能结构一体化激光增材制造工艺的研究仍较少。目前,国内外激光增材制造工艺研究仍主要以试验测试为主。基于激光与物质相互作用原理进行数值仿真,结合成形过程在线监控技术,构建激光增材制造工艺的数字孪生,是激光增材制造工艺未来的发展方向。激光DED增材制造工艺具有成形高效的特点,但成形精度不高,激光增减材复合制造工艺(如激光送粉与铣削增减材复合)为此问题提供了新的解决方案。使用掺镱光纤激光器勉强成形的纯铜等高反射率材料为可见光波段(如蓝光、绿光)光纤激光器的研发提供了契机。进一步发展并降低光纤激光器成本,进而控制金属增材制造装备的整体成本,是推进金属增材产业化进程的必然要求。

参 考 文 献

- [1] Everton S K, Hirsch M, Stravroulakis P, et al. Review of *in situ* process monitoring and *in situ* metrology for metal additive manufacturing [J]. *Materials & Design*, 2016, 95: 431-445.
- [2] Doubenskaia M, Domashenkov A, Smurov I, et al. Study of selective laser melting of intermetallic TiAl powder using integral analysis [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 129: 1-14.
- [3] Fosness E, Carpenter B, Tupper M, et al. Development of low shock deployment devices for aerospace applications using shape memory and elastic memory composites [C] // AIAA Space 2003 Conference & Exposition, Long Beach, California. Reston, Virginia: AIAA, 2003: 6246.
- [4] Shangguan H L, Kang J W, Deng C Y, et al. 3D-printed shell-truss sand mold for aluminum castings [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 250: 247-253.
- [5] Upadhyay M, Sivarupan T, El Mansori M. 3D printing for rapid sand casting: a review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 29: 211-220.
- [6] National Technical Committee on Additive Manufacturing of Standardization Administration of China. Additive manufacturing—terminology: GB/T 35351—2017 [S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
全国增材制造标准化技术委员会. 增材制造术语: GB/T 35351—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [7] Frazier W E. Metal additive manufacturing: a review [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [8] Do T, Kwon P, Shin C S. Process development toward full-density stainless steel parts with binder jetting printing[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 121: 50-60.
- [9] Ziaee M, Crane N B. Binder jetting: a review of process, materials, and methods [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 28: 781-801.
- [10] Zhang Y, Wu L M, Guo X Y, et al. Additive manufacturing of metallic materials: a review [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(1): 1-13.
- [11] Shellabear M, Nyrhilä O. DMLS-development history and state of the art[J/OL]. [2020-03-28]. https://scholar.google.com/scholar?q=DMLS-Development+history+and+state+of+the+art&hl=en&as_sdt=0,5.
- [12] Wang Y B, Li J Y. Status and development tendency of high power ytterbium doped fibers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201009.
王一礴, 李进延. 高功率掺镱光纤的现状与发展趋势 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201009.
- [13] Boddu M R, Landers R G, Liou F W. Control of laser cladding for rapid prototyping: a review[J]. [2020-03-28]. <http://edge.rit.edu/content/P10551/public/SFF/SFF%202001%20Proceedings/2001%20SFF%20Papers/52-Boddu,Control.pdf>.
- [14] Kaielerle S, Barroi A, Noelke C, et al. Review on laser deposition welding: from micro to macro [J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 336-345.
- [15] Fomin V, Gapontsev V, Shcherbakov E, et al. 100 kW CW fiber laser for industrial applications[C] // 2014 International Conference Laser Optics, June 30-July 4, 2014. Saint Petersburg, Russia. [S.l.]: IEEE, 2014:6886450.
- [16] Wu W J, Chen Z L, Wang Z F, et al. Beam combining of fiber lasers by a 3×1 signal combiner at a power >13 kW [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 54: 102109.
- [17] Hudson D D. Invited paper: short pulse generation in mid-IR fiber lasers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(6): 631-641.
- [18] Xie Z X, Shi C D, Sheng Q, et al. A single-frequency 1064-nm Yb³⁺-doped fiber laser tandem-pumped at 1018 nm [J]. *Optics Communications*, 2020, 461: 125262.
- [19] Addanki S, Amiri I S, Yupapin P. Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers[J]. *Results in Physics*, 2018, 10: 743-750.
- [20] Lee H, Lim C H J, Low M J, et al. Lasers in additive manufacturing: a review [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2017, 4(3): 307-322.

- [21] Gong X D, Wang Z, Yu N, et al. Research progress of polymer powder materials for SLS forming technology [J]. *Journal of Functional Materials*, 2019, 50(10): 10027-10039.
龚小弟, 王智, 于宁, 等. 用于选择性激光烧结的聚合物粉末材料研究进展 [J]. *功能材料*, 2019, 50(10): 10027-10039.
- [22] Lin F. Research progress and prospect of electron beam powder bed fusion technology [J]. *New Economy Leader*, 2019(1): 35-39.
林峰. 电子束粉末床熔融技术研究进展与前瞻 [J]. *新经济导刊*, 2019(1): 35-39.
- [23] Zhao D C, Lin F. A review of on-line monitoring techniques in metal powder bed fusion processes [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(17): 2100-2110, 2118.
赵德陈, 林峰. 金属粉末床熔融工艺在线监测技术综述 [J]. *中国机械工程*, 2018, 29(17): 2100-2110, 2118.
- [24] Tolochko N K, Khlopkov Y V, Mozzharov S E, et al. Absorptance of powder materials suitable for laser sintering [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2000, 6(3): 155-161.
- [25] Garban-Labaune C, Fabre E, Max C E, et al. Effect of laser wavelength and pulse duration on laser-light absorption and back reflection [J]. *Physical Review Letters*, 1982, 48(15): 1018.
- [26] Wang W, Tang X H, Qin Y X, et al. Influence of resonator mirror surfaces on output mode of radio frequency slab CO₂ lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0402004.
王伟, 唐霞辉, 秦应雄, 等. 腔镜面型对射频板条 CO₂ 激光器输出模式的影响 [J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0402004.
- [27] Yang Y Q, Chen J, Song C H, et al. Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011401.
杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011401.
- [28] Bai Y C, Yang Y Q, Wang D, et al. Selective laser melting of tin bronze alloy and its properties [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(3): 1007-1012.
白玉超, 杨永强, 王迪, 等. 锡青铜激光选区熔化工艺及其性能 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(3): 1007-1012.
- [29] Bai Y C, Wang D, Yang Y Q, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of maraging steel by selective laser melting [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 760: 105-117.
- [30] Song C H, Yang Y Q, Wang Y D, et al. Research on process and property of CoCrMo alloy directly manufactured by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 0603001.
宋长辉, 杨永强, 王贻达, 等. CoCrMo 合金激光选区熔化成型工艺及其性能研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0603001.
- [31] Sun J F, Yang Y Q, Wang D. Parametric optimization of selective laser melting for forming Ti6Al4V samples by Taguchi method [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 118-124.
- [32] Liu J W, Song Y N, Chen C Y, et al. Effect of scanning speed on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting [J]. *Materials & Design*, 2020, 186: 108355.
- [33] Bi J, Lei Z L, Chen Y B, et al. Microstructure and mechanical properties of a novel Sc and Zr modified 7075 aluminum alloy prepared by selective laser melting [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 768: 138478.
- [34] Wei K, Yang Q D, Ling B, et al. Mechanical properties of Invar 36 alloy additively manufactured by selective laser melting [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 772: 138799.
- [35] Montero-Sistiaga M L, Godino-Martinez M, Boschmans K, et al. Microstructure evolution of 316L produced by HP-SLM (high power selective laser melting) [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 402-410.
- [36] Rafi H K, Karthik N V, Gong H J, et al. Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, 22(12): 3872-3883.
- [37] Read N, Wang W, Essa K, et al. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: process optimisation and mechanical properties development [J]. *Materials & Design (1980—2015)*, 2015, 65: 417-424.
- [38] Simonelli M, Tse Y Y, Tuck C. Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 616: 1-11.
- [39] Bai Y C, Yang Y Q, Wang D, et al. Influence mechanism of parameters process and mechanical properties evolution mechanism of maraging steel 300 by selective laser melting [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 703: 116-123.

- [40] Liu Y, Yang Y Q, Mai S Z, et al. Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder[J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 797-806.
- [41] Colopi M, Caprio L, Demir A G, et al. Selective laser melting of pure Cu with a 1 kW single mode fiber laser[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 59-63.
- [42] Zhang M K, Yang Y Q, Wang D, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V gradient structures manufactured by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 736: 288-297.
- [43] Chen J, Yang Y Q, Song C H, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of 316L / CuSn10 multi-material bimetallic structure fabricated by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 752: 75-85.
- [44] Xiao Z F, Yang Y Q, Xiao R, et al. Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2018, 143: 27-37.
- [45] Zhang M K, Yang Y Q, Wang D, et al. Microstructure and mechanical properties of CuSn/18Ni300 bimetallic porous structures manufactured by selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2019, 165: 107583.
- [46] Thompson S M, Bian L K, Shamsaei N, et al. An overview of direct laser deposition for additive manufacturing: transport phenomena, modeling and diagnostics[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 8: 36-62.
- [47] Singh D D, Arjula S, Reddy A R. Metal additive manufacturing by powder blown beam deposition process[J]. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2019, 9(2): 5291-5304.
- [48] Zong G S, Zhao H. Technology and application of metal 3D printing[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2019, 29(5): 1-6.
宗贵升, 赵浩. 金属增材制造技术工艺及应用[J]. *粉末冶金工业*, 2019, 29(5): 1-6.
- [49] Yang Y Q, Weng C W, Zhou Q, et al. Research on the process and prediction model for size of 316L stainless steel fabricated by plasma arc additive manufacturing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(15): 31-38.
杨永强, 翁昌威, 周权, 等. 316L 不锈钢等离子增材制造工艺与尺寸预测模型研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(15): 31-38.
- [50] Xu K K, Chen K X, Qiu W J, et al. Study on equipment and process of plasma arc additive manufacturing[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(23): 221-224.
许可可, 陈克选, 仇文杰, 等. 等离子弧增材制造设备与其工艺研究[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(23): 221-224.
- [51] Chen Z Y, Suo H B, Li J W. The forming character of electron beam freeform fabrication[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2010(1): 36-39.
陈哲源, 锁红波, 李晋炜. 电子束熔丝沉积快速制造成型技术与组织特征[J]. *航天制造技术*, 2010(1): 36-39.
- [52] Kazanas P, Deherkar P, Almeida P, et al. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226(6): 1042-1051.
- [53] Majumdar J D, Manna I. Introduction to laser assisted fabrication of materials[M] // *Laser-Assisted Fabrication of Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 1-67.
- [54] Tang H B, Wu Y, Zhang S Q, et al. Research status and development trend of high performance large metallic components by laser additive manufacturing technique [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2019, 11(4): 58-63.
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.
- [55] Keicher D M, Jellison J L, Schanwald L P, et al. Towards a reliable laser spray powder deposition system through process characterization [C] // *International Technical Conference of the Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE)*. Washington, D. C.: [s. n.], 1995: 97201.
- [56] Keicher D M, Romero J A, Atwood C L, et al. Laser engineered net shaping (LENSTM) for additive component processing [C] // *1996 Rapid Prototyping and Manufacturing*, Dearborn, MI (United States). Washington, D.C.: [s. n.], 1996: 231692.
- [57] Keicher D M, Romero J A, Atwood C L, et al. Free form fabrication using the laser engineered net shaping (LENSTM) process [R]. [S. l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1996: 425303.
- [58] Carroll B E, Palmer T A, Beese A M. Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing[J]. *Acta Materialia*, 2015, 87: 309-320.
- [59] Keist J S, Palmer T A. Role of geometry on

- properties of additively manufactured Ti-6Al-4V structures fabricated using laser based directed energy deposition[J]. *Materials & Design*, 2016, 106: 482-494.
- [60] Åkerfeldt P, Antti M L, Pederson R. Influence of microstructure on mechanical properties of laser metal wire-deposited Ti-6Al-4V [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 674: 428-437.
- [61] Li Z, Chen J, Sui S, et al. The microstructure evolution and tensile properties of Inconel 718 fabricated by high-deposition-rate laser directed energy deposition [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31: 100941.
- [62] Angelastro A, Campanelli S L, Casalino G. Statistical analysis and optimization of direct metal laser deposition of 227-F colmonoy nickel alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 94: 138-145.
- [63] Huang W B, Zhang Y M, Dai W B, et al. Mechanical properties of 304 austenite stainless steel manufactured by laser metal deposition[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 758: 60-70.
- [64] Arrizubieta J I, Lamikiz A, Cortina M, et al. Hardness, grainsize and porosity formation prediction on the laser metal deposition of AISI 304 stainless steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 135: 53-64.
- [65] Kim D K, Woo W, Kim E Y, et al. Microstructure and mechanical characteristics of multi-layered materials composed of 316L stainless steel and ferritic steel produced by direct energy deposition [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 774: 896-907.
- [66] Akbari M, Kovacevic R. An investigation on mechanical and microstructural properties of 316LSi parts fabricated by a robotized laser/wire direct metal deposition system[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 487-497.
- [67] Shiva S, Palani I A, Mishra S K, et al. Investigations on the influence of composition in the development of Ni-Ti shape memory alloy using laser based additive manufacturing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 69: 44-51.
- [68] Xiang S, Luan H W, Wu J, et al. Microstructures and mechanical properties of CrMnFeCoNi high entropy alloys fabricated using laser metal deposition technique[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 773: 387-392.
- [69] Su S, Lu Y Z. Laser directed energy deposition of Zr-based bulk metallic glass composite with tensile strength[J]. *Materials Letters*, 2019, 247: 79-81.
- [70] Lv F, Shen L D, Liang H X, et al. Mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by laser melting deposition and improvements via heat treatment[J]. *Optik*, 2019, 179: 8-18.
- [71] Li H, Chen B, Tan C W, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of laser metal deposition of Invar 36 alloy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 125: 106037.