

# 激光器在增材制造中的应用

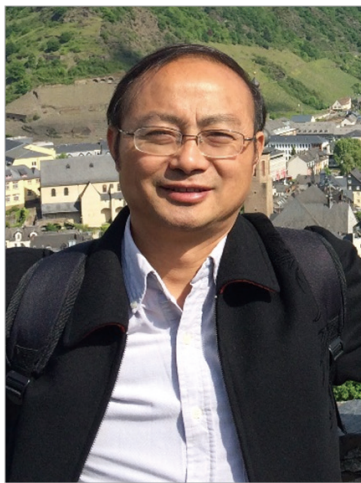
陈继民<sup>1,2</sup>, 张成宇<sup>1,2</sup>

(1. 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124;  
2. 北京市数字化医疗 3D 打印研究中心, 北京 100124)

**[摘要]** 为了解激光对增材制造的影响,综述了增材制造中广泛应用的激光类型,针对每种激光类型分析了增材制造相关的重要参数。此外,对于每种激光器在增材制造中应用存在的优点和限制性进行了剖析。对于每种增材制造方式,介绍了所适用激光器的最新进展。最后,讨论了基于激光技术的增材制造的未来前景。研究表明,CO<sub>2</sub>和Nd:YAG激光器仍然是各种激光制造技术的中坚力量;Yb光纤激光器具有更高的平均功率、系统稳定性、高参数可调性和低维护成本等优势,正逐渐替代Nd:YAG激光器;尽管准分子激光器光束质量相对较低且成本较高,但仍需要其基于高功率紫外激光的增材制造以用于研究目的;基于激光的增材制造必须根据目标性能选择作为增材制造的激光源。

**关键词:** 增材制造; 3D 打印; 立体光固化; 选择性激光烧结; 选择性激光熔化; 直接金属激光烧结

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.22.042



陈继民

教授、博士生导师,研究方向为激光加工、增材制造。主持完成了国家自然科学基金、北京市科委重大科技项目等,发表论文 150 余篇,出版专著 4 部,译著 1 部。2016 年获中国产学研合作创新奖。

基于层层堆叠的增材制造(也称为 3D 打印)在为最终用户实现可定制生产方面具有巨大潜力,因此,引

起了人们的极大关注。增材制造相对于传统的减材制造具有许多优势,可在最少的生产周期和更少的材料浪费情况下生产复杂零部件<sup>[1-4]</sup>。在增材制造中能轻松实现最佳零部件设计,例如实现具有内部冷却通道的空心零件或模具的轻量化,可以大大节省原材料,而不会造成质量下降。此外,不使用模具的最终用途生产方式可以节省总体生产材料和能源,尤其是在飞机和汽车行业,其次是减少碳和温室气体排放<sup>[5]</sup>。尽管增材制造作为一种传统制造的替代技术引起了人们的关注,并且已经应用于各个领域,但是仍然需要进一步的改进,以在可打印材料、打印精度和生产效率方面扩展应用范围<sup>[6-8]</sup>。在材料沉积工艺中,能量需要有效地转移到材料的指定位置,以使其熔化、软化或固化,之后,重复的逐层沉积制作零件。例如,在熔融沉积成形中,热能通过喷嘴热传导传递到打印材料,使材料流过喷嘴口到达目标位

置。与其他方法相比,由于接触区域面积有限,热传导速率低,以及熔融材料在喷嘴口的挤出缓慢,导致生产效率低下。为了获得高打印分辨率和高质量表面,需要保持熔融材料的恒定挤出压力。为了避免这些问题,可将能量直接转移到材料所需位置上。为此,最常用的能源就是激光,因为高强度激光束可直接作用于材料表面,而无需任何转移介质。激光能量导致光化学反应立即使材料固化或光热反应使材料融化或烧结<sup>[9-11]</sup>。激光产生的空间相干光与热光源或发光二极管(LED)等非相干光源不同,激光束的传播不会在远距离上造成临界光束发散或功率损耗,并且还可以聚焦到很小的直径,可以在零件制造中达到更高的精度和效率。

激光器在增材制造领域的市场收入的份额在很大程度上受到金属增材制造增长的推动。例如金属增材制造在直接金属激光烧结(DMLS)

和选择性激光熔化 (SLM) 机器中广泛使用掺镱 (Yb) 光纤激光器。从 2015 年到 2020 年, 国内金属增材制造业的市场收入平均年复合增长率高达 30%, 从 2014 年的 1.6 亿美元达到 2020 年 7.8 亿美元的市场规模<sup>[12]</sup>。因此, 回顾增材制造中的激光器基础知识对于理解基于激光的增材制造对行业增长的影响至关重要。为了解激光对增材制造技术的影响, 综述讨论了用于增材制造中激光的基本原理, 影响制造性能的关键激光参数, 以及具有代表性的激光增材制造方法。首先简要介绍了激光的基本原理, 之后分析了目前用于 3D 打印机的不同类型的激光器, 如 CO<sub>2</sub> 激光器、钕钇铝石榴石激光器 (Nd: YAG)、镱掺杂光纤激光器 (Yb-fiber) 和准分子激光器。为了更好地理解激光参数对制造的影响, 深入探讨了关键激光参数 (如波长、功率或能量、脉冲持续时间和光斑尺寸) 对制造性能的影响。在此基础上, 对基于激光的增材制造方法进行了讨论。

## 增材制造中的常用激光器

激光器通常由增益介质、泵浦能量源和光学谐振器组成。放置在光谐振器内部的增益介质使用泵浦源提供的外部能量通过受激辐射来放大光束。激光器通常按使用的增益介质分类可分为固体激光器、气体激光器、准分子激光器、染料激光器、光纤或半导体激光器。增材制造中使用的最具代表性激光器包括气体激光器、固体激光器和光纤激光器, 如图 1 所示。这些激光器通常用于增材制造和许多其他精密制造应用。

### 1 CO<sub>2</sub> 激光器

CO<sub>2</sub> 激光器是最早的气体激光器之一, 于 1964 年开发<sup>[13]</sup>。CO<sub>2</sub> 激光器由放电管、泵浦源和若干光学器件组成, 如图 2 所示。在 CO<sub>2</sub> 激光器

中, 气态增益介质 CO<sub>2</sub> 充满放电管并通过直流或交流电进行电泵浦, 引起粒子数反转, 从而产生激光。CO<sub>2</sub> 激光器可以产生波长为 9.0~11.0 $\mu\text{m}$  的红外光, 其中 10.6 $\mu\text{m}$  是增材制造中使用最广泛的波长。对于红外波长范围激光的传导, 光学部件需要使用特殊材料, 反射镜通常为镀银或镀金, 窗口和透镜使用锗或硒化锌<sup>[14]</sup>。与其他连续波长激光器相比, CO<sub>2</sub> 激光器具有高效率 (5%~20%) 和高输出功率 (0.1~20kW) 的特点, 因此广泛用于材料加工, 例如切割、钻孔、焊接和表面改性<sup>[15-16]</sup>。CO<sub>2</sub> 激光器一般由两个反射镜和之间的电动抽气

管组成, 其中反射镜包括一端的高反射率镜和另一端的部分反射镜 (输出耦合镜)。此外, 还包括用于电极冷却的散热装置, 以实现超过千瓦级别的高功率运行。系统的简单性带来了低成本、高可靠性和系统紧凑性, 这使得 CO<sub>2</sub> 激光器成为精密制造的主力军。然而, 由于在能量泵送至大量 CO<sub>2</sub> 气体的过程中产生热量, 激光结构的热膨胀和收缩导致输出功率相对不稳定, 气体辅助热扩散过程中的气体湍流也可能引起不稳定性<sup>[17-18]</sup>。在高功率操作中, 应每 2000h 检查一次整体光学器件的疲劳度。在金属零件的制造中, 由于金属对红

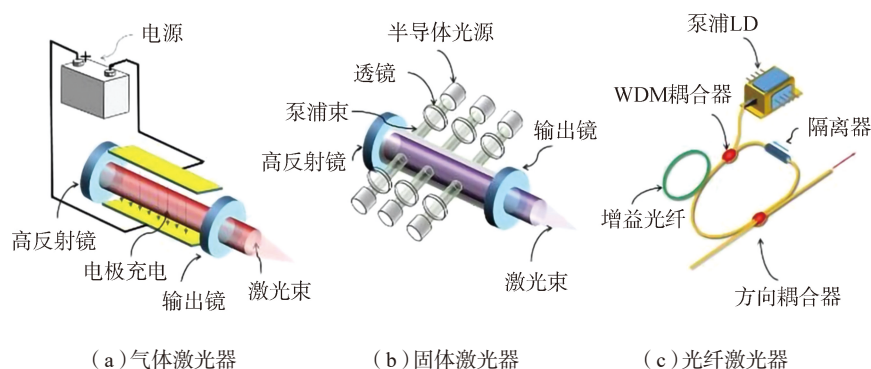
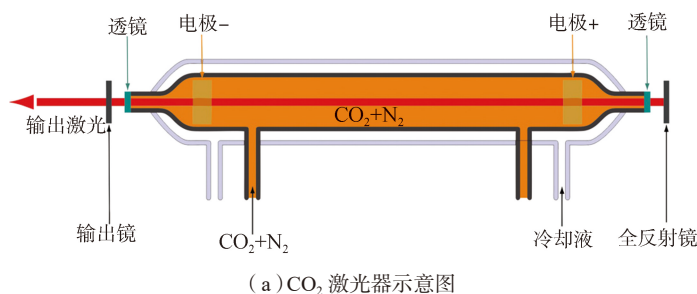


图1 不同增益介质的激光器原理图

Fig.1 Laser schematics with different gain materials



(a) CO<sub>2</sub> 激光器示意图



(b) 商用 CO<sub>2</sub> 激光器

图2 CO<sub>2</sub> 激光器

Fig.2 CO<sub>2</sub> laser

外线区域光吸收系数较低, CO<sub>2</sub> 激光器的工作效率受到限制。此外, 由于缺少在红外波长范围内传输的光纤, CO<sub>2</sub> 激光器需要使用光学器件进行空间光束传输, 因此, 为了更广泛的材料加工或利用能够基于光纤的光束传输, 必须考虑其他类型的激光器。

## 2 钕铝石榴石(Nd : YAG)固体激光器

Nd : YAG 激光器是一种使用棒状 Nd : YAG 晶体作为固体增益介质的激光器。Nd : YAG 激光器和 CO<sub>2</sub> 激光器是业界最常用的两种高功率激光器。在 Nd : YAG 激光器中, 增益介质由闪光灯沿径向方向进行光泵浦, 或由 808nm 激光二极管沿轴向泵浦, 以产生 1064nm 的近红外(NIR) 输出波长<sup>[14]</sup>, 如图 3 所示。在此工作波长下, 光束可以通过柔性光纤传输, 在系统紧凑性和高传输效率方面是较 CO<sub>2</sub> 激光器的显著优势之一<sup>[17]</sup>。Nd : YAG 激光器在连续模式(掺有低浓度的晶体)和脉冲模式下(掺有高浓度的晶体)都可以工作。连续模式下的输出功率高达几千瓦, 而脉冲模式下的峰值功率则高达 20kW(脉冲能量高达 120 J)。

传统的 Nd : YAG 激光器通常由氙气闪光灯进行光泵浦, 电光功率转换效率相对较低。低功率效率会导致光束质量低下, 因为大部分未吸收的能量都以热量的形式散发, 光学元件的加热会引起热透镜效应和双折射效应, 从而导致光束质量差<sup>[19]</sup>。闪光灯短寿命可以通过使用二极管激光器代替泵浦光源(二极管泵浦固态(DPSS)激光器)来克服<sup>[20-21]</sup>。由于激光二极管具有更高的电光功率转换效率以及增益介质的选择性激发, 与灯泵浦激光器相比, 该种激光器的整体功率效率可提高约 5 倍。在增材制造中, Nd : YAG 激光器已被更紧凑, 更高效的镱(Yb)掺杂光纤激光器取代。但是, Nd : YAG

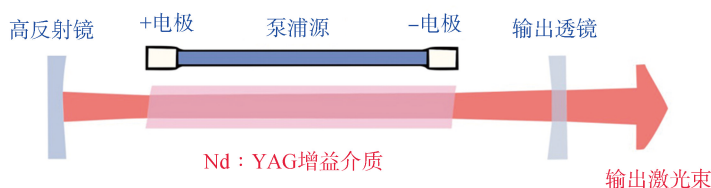
激光器的普遍性和易用性仍然使它们在参数研究工作中大量使用<sup>[22]</sup>。

## 3 镱(Yb)掺杂的光纤激光器

光纤激光器是指其光纤增益介质掺有稀土的激光器。在光纤激光器的首次开发的几年中, 与固体激光器相比, 光纤激光器在输出功率和脉冲能量方面性能有限。然而, 由于光纤激光器在过去几十年中的不断发展, 已成为最有希望替代传统固体激光器的光源。在各种稀土掺杂增益光纤中, Yb 掺杂光纤由于其量子效

率高(高达 94%), 有利于高功率激光产生<sup>[23-24]</sup>, 如图 4 所示。

因此, 光纤激光器广泛用于材料加工并已在增材制造中替代了 Nd : YAG 激光器<sup>[25]</sup>。光纤激光器由在 950~980nm 波长范围激光二极管泵浦, 产生 1030~1070nm 的输出波长的近红外激光束。基于光纤的增益介质和光学组件的特性, 带来了包括高电光效率(~25%)、高光束质量、抗干扰性强以及系统紧凑性好等优点。然而 Yb 光纤激光器也存在



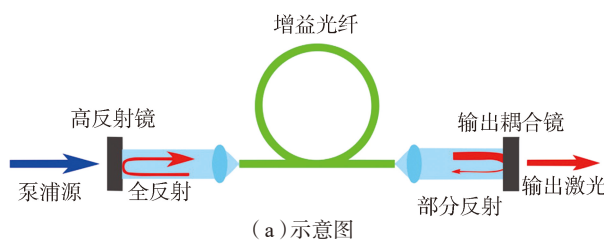
(a) Nd : YAG 激光器的示意图



(b) 商用 Nd : YAG 激光器

图3 Nd : YAG激光器

Fig.3 Nd : YAG laser



(a) 示意图



(b) 商用光纤激光器

图4 Yb掺杂光纤激光器

Fig.4 Yb fiber laser

由于光在光纤内部传播而产生一些限制。对于固体激光器,光在空气中传播,空气作为光导介质的影响较小。相反,当光通过光纤传播时,激光受到引导介质即光纤的强烈影响,特别是在其非线性特性上,高峰值功率引起的光学非线性效应(例如自聚焦、自相位调制、克尔透镜效应和拉曼效应)会限制激光器的性能。光纤弯曲、振动和温度变化会导致偏振变化,为了获得更高的环境稳定性,需要使用偏振保持(PM)光纤作为增益和光导介质。

#### 4 准分子气体激光器

准分子激光器使用“准分子”作为增益介质,并通过脉冲放电泵浦以在紫外(UV)区域产生纳秒级脉冲。准分子是激发二聚体的简称,是包含稀有气体(例如氙气或氙气等)、卤素(例如氟气或氯气等)和缓冲气体(通常是氖气或氦气)的气体混合物。在工作波长范围为157~351nm(取决于气体混合物)的各种准分子激光器中,ArF、KrF和XeCl激光

器(分别产生193、248和308nm波长光束)是制造中应用最多的准分子激光器<sup>[26]</sup>。准分子激光器还包括泵浦源、增益介质和光学谐振器,如图5所示,增益介质以与其他气体激光器(例如CO<sub>2</sub>)相同的方式被电流泵浦。准分子激光器只能在脉冲模式下运行,产生的脉冲重复频率仅为几kHz,平均输出功率在几瓦到几百瓦之间。紫外线脉冲激光的产生在制造应用中非常重要,因为大多数光学材料在紫外波长区域具有高吸收率。然而,由于光束质量相对较差,维护以及运行成本较高使得准分子激光器在增材制造中应用较少<sup>[27]</sup>。

### 激光在增材制造应用中的关键参数

增材制造中的关键激光参数包括平均功率、功率稳定性、中心波长、光谱带宽、光束直径、光束质量、脉冲能量、脉冲持续时间和重复率。由于参数的重要性因目标应用而异,对增

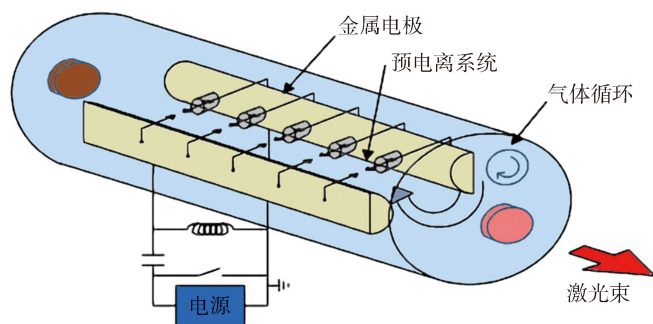
材制造中的关键激光参数进行了分类,以理解它们是如何影响制造性能。在增材制造技术中,大多数关键的激光参数与基于热过程的光-材料相互作用有关。本综述将代表性的关键参数分成了4个部分,即波长(工作波长)、功率(平均功率、脉冲能量和强度)、时间(脉冲持续时间)和空间(光束质量和聚焦光斑尺寸)。尽管这些参数有所不同,但彼此密切相关,因此同一参数将在不同部分重复出现。

#### 1 工作波长

由于不同的材料与不同的激光波长之间的相互作用,激光的工作波长是增材制造中要考虑的最重要的参数。表1<sup>[28]</sup>列出了在Nd:YAG和CO<sub>2</sub>激光器的工作波长下各种松散粉末状态材料的吸收率。在基于激光的增材制造中,目标材料应该有效地与入射激光相互作用,因此,期望在特定激光波长下的高材料吸收以达到较高的生产效率<sup>[29-30]</sup>。对于金属粉末,激光的波长越短,其光吸收率越好。因此,在金属打印过程中,工作波长为1064nm的Nd:YAG或Yb光纤激光器比工作波长为10.6μm的CO<sub>2</sub>激光器具有更高的效率。相反,聚合物材料作为增材制造中使用的最重要的材料之一,其在10.6μm处的吸收率比在1064nm高得多,如图6所示<sup>[31-32]</sup>,Sing等<sup>[29]</sup>解释了聚合物广泛使用CO<sub>2</sub>激光器的原因。工作波长也与聚焦性有关,而聚焦性决定了最终的制造分辨率。由于光学衍射极限,最小聚焦光斑尺寸与波长成正比,因此CO<sub>2</sub>激光器不适合微米/纳米尺度的制造。

#### 2 平均功率、脉冲能量和强度

激光是将能量传递给打印材料的能源之一,因此,定义为单位面积激光功率的功率密度即强度与工艺产量密切相关。首先,激光强度必须超过一定的能量阈值以使目标材料达到原位固化、烧结或熔化所需的条



(a) 准分子激光器的示意图



(b) 商用准分子激光器

图5 准分子激光器  
Fig.5 Excimer laser

件<sup>[33]</sup>。对于粉末或线材形式的材料,该条件与烧结温度或熔点有关,而对于光聚合物树脂材料来说,强度与其固化或聚合有关。与大多数烧结或熔化温度相对较低的聚合物高分子材料不同,陶瓷等一些材料具有极高

的熔点(如二硼化锆,熔点 3245℃),因此需要极高强度的激光。此外,具有高反射率或高热扩散率的材料如铝或铜等,也需要高强度激光来克服温度升高过慢的问题,若激光强度高于制造阈值,采用更高强度的激光也可以提高成形构建速率。图 7<sup>[32]</sup>为 Frazier 描述的在金属的增材制造中成形速率、功率和特征质量之间的关系。可以看出,通过采用更高功率的激光可以增加成形速率,但是在高成形速率下制造的特征质量将会降低。因此,应综合考虑成形速率和特征质量,在满足材料成形的阈值能量基础上选择光束功率<sup>[34]</sup>。激光束的聚焦强度不仅与平均功率成比例关系,还与最终由工作波长所决定的聚焦光斑尺寸成比例。虽然 CO<sub>2</sub> 激光器和 Yb 光纤激光器具有相同的平均功率,但是 Yb 光纤激光器的强度可能比 CO<sub>2</sub> 激光器高数百倍,这是由于聚

焦光斑强度与激光波长的平方成反比,Yb 光纤激光器的波长更短、光束质量更高,所以 Yb 光纤激光器的激光束聚焦光斑可以比 CO<sub>2</sub> 激光器小得多。

### 3 脉冲宽度

激光工作模式在时域上可分为连续模式或脉冲模式。在连续模式下,输出功率保持恒定且与时间无关;而在脉冲模式下,激光器仅在短脉冲持续时间内以固定的重复率发射输出功率。除只能在脉冲模式下工作的准分子激光器外,大多数激光器可以在两种模式下工作。脉冲模式可以通过调 Q、锁模或脉冲泵浦实现,脉冲模式可以产生比连续模式更高的峰值功率。脉冲持续时间为几纳秒的 Nd : YAG 激光器可产生峰值功率为数百毫瓦的脉冲,可在毫秒的曝光时间内熔化大多数目标材料。具有高峰值功率的激光脉

表1 在Nd : YAG和CO<sub>2</sub>激光器的工作波长下,各种材料在松散粉末状态下的吸收率  
Table 1 Absorptivity of various materials in a loose powder state at operating wavelength of Nd : YAG and CO<sub>2</sub> lasers

材料		Nd : YAG 激光器 (1.06μm)	CO <sub>2</sub> 激光器 (10.6μm)
金属材料 / %	Cu	59	26
	Fe	64	45
	Sn	66	23
	Ti	77	59
	Pb	79	—
陶瓷材料 / %	ZnO	2	94
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	96
	SiO <sub>2</sub>	4	96
	SnO	5	95
	CuO	11	76
	SiC	78	66
	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	81	70
	TiC	82	46
	WC	82	48
	聚合物 / %	聚四氟乙烯	5
聚丙烯酸甲酯		6	75
环氧树脂基聚合物		9	94
混合材料 / %	Cu-10Al (质量分数)	63	32
	Fe-3C-3Cr-12V+10Ti (质量分数)	65	39
	Fe-0.6C-4Cr-2Mo-1Si+15TiC (质量分数)	71	42
	Fe-1C-14Cr-10Mn-6Ti+66TiC (质量分数)	79	44

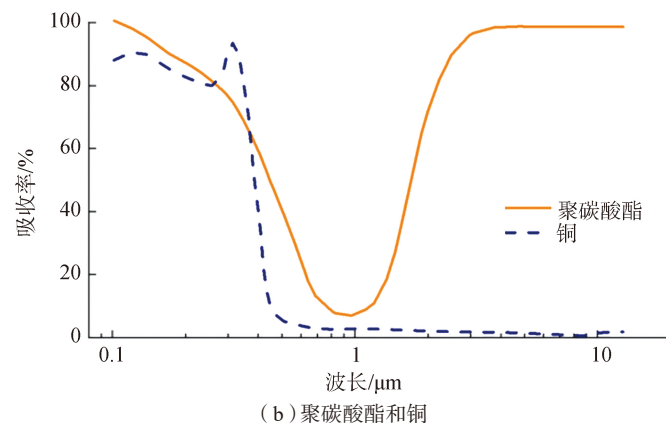
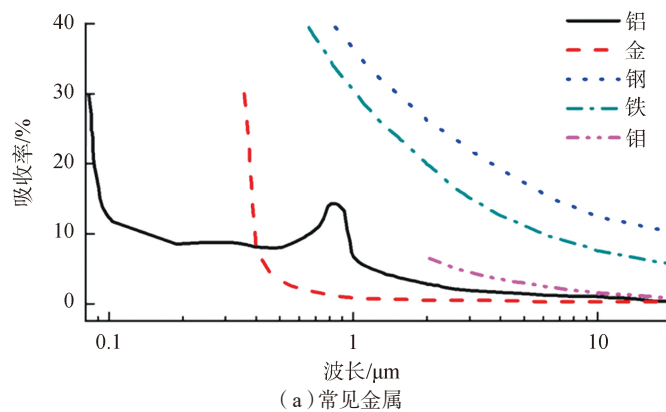


图6 不同波长的光吸收率

Fig.6 Light absorptivity at different wavelengths

冲可以瞬间提高材料的温度,同时向周围材料的热能传递耗散很小,这使得更容易达到加工所需的阈值能量。相反,在连续波模式中,激光以相同的平均功率扩散到周围的材料,使得难以达到阈值能量。图 8<sup>[35]</sup>为 Mumtaz 等研究基于 SLM 增材制造工艺的 Nd : YAG 脉冲激光器处理镍基 625 合金时,熔化条件、脉冲能量和脉冲持续时间之间的关系示意图。在 SLM 工艺过程中,被激光束照射的材料应在短时间内充分加热,因此在脉冲持续时间内需要高脉冲能量来熔化金属粉末。一般地,对于从连续波到几十皮秒脉冲持续时间的激光,其与材料的相互作用可

以通过热扩散来解释,并且其阈值和脉冲的时域宽度的平方根成比例关系。

#### 4 光束质量和聚焦光斑尺寸

光束质量和聚焦光斑大小是空间域中的激光参数,为了提高制造精度,必须将这些参数考虑在内。在增材制造中,通常以“光束参数乘积(BPP)”定义光束质量。它是光束在空间域中的宽度(光腰束宽)和在空间频率域中的角谱宽度(远场发散角)的乘积( $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ )。BPP 与功率密度密切相关,并影响制造分辨率,该因素取决于增益介质、泵浦源、谐振器结构和工作波长。特别是工作波长决定了 BPP 的下限,即  $\lambda/\pi$ ,

定义为衍射极限,例如,1064nm 的 Nd : YAG 激光束的最小 BPP 约为  $0.339\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。理想情况下,当光束轮廓是完美的高斯形状时,可以获得最小 BPP。M2 因子(光束质量因子)也是定义光束质量的一种更为简单的方式,其与波长因素无关。M2 因子定义为 BPP 除以  $\lambda/\pi$ ,若为理想的高斯光束,则 M2 因子为 1。 $\text{CO}_2$  激光器、Nd : YAG 激光器和 Yb : YAG (掺镱钇铝石榴石)激光器的光束质量如图 9 所示<sup>[36]</sup>,其中的实线表明由工作波长下的衍射极限所确定的 BPP 和 M2 因子之间的关系。尽管  $\text{CO}_2$  激光器的衍射极限比 Nd : YAG 激光器高 10 倍之多,但其 BPP 值为  $3\sim 5\text{mm} \cdot \text{mrad}$ ,与二极管泵浦的 Nd : YAG 激光器相似。值得注意的是,由于更为简单的光学结构和稳定的电泵浦方法, $\text{CO}_2$  激光器具有相对较低的 BPP 值且其 M2 因子接近为 1。Yb 光纤激光器的光束最接近高斯光束,其优良光束质量可以归因于其基于光纤的传播方式;当激光束通过光纤传播时,由于光纤有限的模场直径,高阶空间模得以滤除,只有单一或有限数量的空间模保留在其内部。相比之下,准分子激光器由于其高阶空间模式和高光束发散角,光束质量相对较差,此外,它的输出光束形状为矩形且在 X 轴和 Y 轴上具有不对称的发散角。

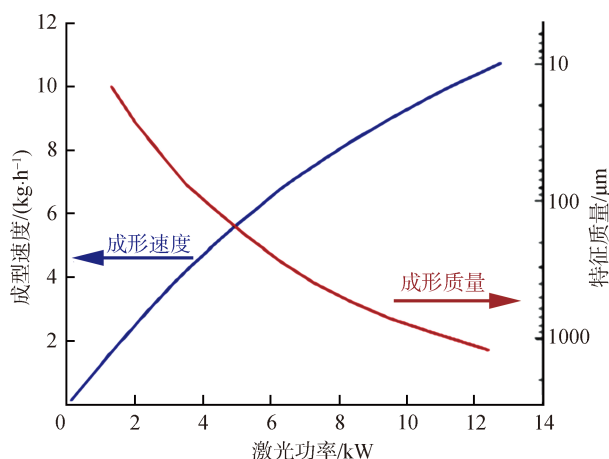


图7 在金属增材制造中成形速率、功率和特征质量之间的关系  
Fig.7 Relationship of modeling rate, power and feature quality

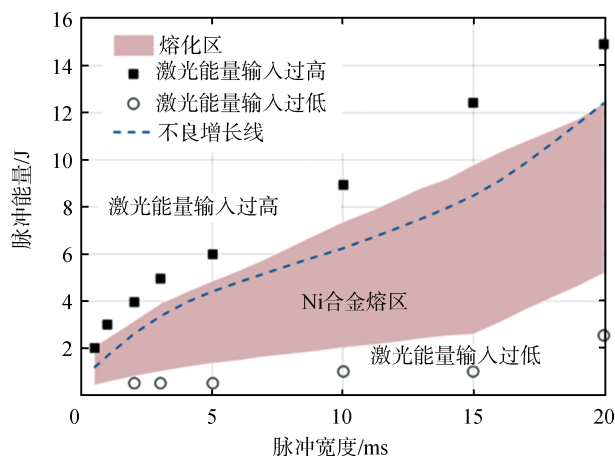


图8 镍625合金熔化区脉冲能量与脉冲持续时间的关系  
Fig.8 Pulse energy versus pulse duration for melting region of Inconel 625

#### 基于激光的增材制造技术

目前,基于激光的最具代表性增材制造工艺包括立体光刻技术(SLA)、激光选区烧结技术(SLS)、激光选区熔化技术(SLM)和激光熔覆技术(LENS)。根据美国材料实验协会(ASTM)“ASTM F42-增材制造”的分类定义,SLA 归类为光聚合工艺;SLS 和 SLM 归类为粉末工艺;LENS 归类为有向能量沉积工艺。这些工艺利用不同类型的激光和材料沉积方法来实现逐层制造<sup>[37]</sup>。

### 1 立体光刻(SLA)

SLA 是最早的增材制造方法之一,首先由 Chuck Hull 于 1984 年申请专利<sup>[38]</sup>。SLA 是一种通过将紫外(UV)激光聚焦在光敏聚合物树脂槽上而进行选择性光聚合的工艺。激光束在要固化的树脂层上绘制出轮廓,之后下降一层的距离,再将下一层未固化的树脂在前一层的顶部固化,重复此过程,直到获得所需的三维结构或部件为止<sup>[39-40]</sup>。紫外光是许多光化学及光聚合过程中的重要波长,SLA 工艺中的聚合反应一般为基于自由基或阳离子,在自由基聚合中,光引发剂吸收入射的光子,然后产生自由基,自由基开始聚合反应。因此,为了获得更高的效率,激光光源的工作波长必须与光引发剂的高吸收波长范围相匹配,通常在紫外波长范围内。早期 SLA 工艺所用商业化的树脂主要是丙烯酸基,目前使用的新型树脂主要是基于环氧树脂,因为基于环氧树脂的树脂材料具有更好的机械性能和较小的收缩率<sup>[41]</sup>。商业 SLA 系统利用掺钕钒酸钇(Nd:YVO<sub>4</sub>)二极管泵浦中心波长为 1064nm 的固态激光器,然后通过 3 次谐波过程,将其波长转换为 355nm。

为了固化光敏树脂,临界激光强度( $E_c$ )必须高于某个阈值。常用光敏树脂的  $E_c$  值介于 4.3~7.6mJ/cm<sup>2</sup> 之间<sup>[41]</sup>。当高斯激光作为光源时,树脂的固化线类似于抛物线形状,如果扫描速度增加或光斑尺寸减小,则层厚度通常会减小。扫描速度增加或光斑尺寸增大会严重影响  $E_c$ ,进而影响树脂的聚合。Yi<sup>[41]</sup> 等研究结果如图 10 所示,主要描述了相对于不同的光斑直径、层厚度和扫描速度之间的关系,表明可以通过控制这两个参数来调节层厚度。大多数 SLA 工艺 3D 打印机使用的是紫外波段范围内的激光器,但有时也会使用紫外范围以外的其他波长。采

用红外激光作为能源的 SLA 技术称为红外(IR)SLA<sup>[42]</sup>,IR SLA 利用热引发的过程代替了通常的紫外激光引发的聚合过程,通常以 CO<sub>2</sub> 激光为热敏树脂提供热能。微立体光刻法( $\mu$ SL)是另一种从传统的 SLA 工艺衍生而来的技术,用于生产具有微米分辨率的小型复杂模型。 $\mu$ SL 与传统光固化增材制造工艺类似,均为施加能量源以光固化光敏聚合物,但  $\mu$ SL 通常采用较小的光斑尺寸,并且需要精确控制照射到树脂上的激光能量,使其接近聚合所需的临界能量。可使用高吸收性反应介质和中性吸收剂,从而有助于形成更薄的聚合层以获得更好的横向分辨率<sup>[43]</sup>。

### 2 选区激光烧结(SLS)

SLS 是由 Carl R. Deckard 于 1980 年代中期开发并获得专利的一种增材制造工艺<sup>[44]</sup>。通过在顶部上堆叠多层烧结的粉末,可以构造复杂的零件和结构。该工艺使用高功率激光器以提供粉末烧结所需的热能。采用光束偏转系统将激光束聚焦到所需位置,然后将新的粉末层沉积在已烧结材料的顶部,并重复该过程,直到获得所需的三维零件为止。当温度升高到金属的熔点或聚合物的软化点以上时,粉末颗粒之间就会发生烧结。在某些情况下,添加黏合剂(通常在金属 SLS 中采用)作为牺牲材料,以改善具有高硬度材料的烧结工艺。为了烧结更大尺寸的粉末颗

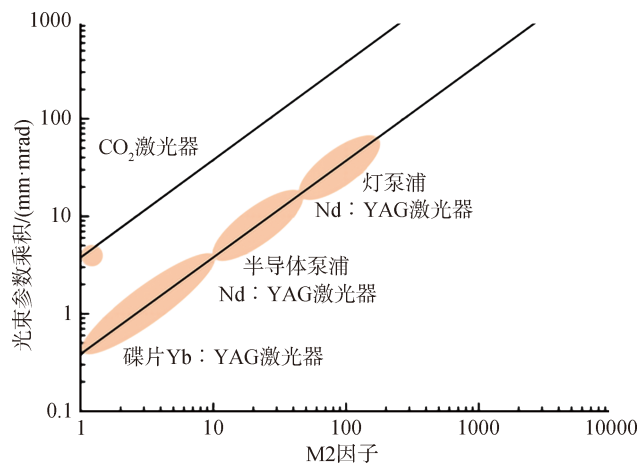


图9 几种激光器的激光参数乘积与光束质量值  
Fig.9 Beam parameter product and M2 values of various laser types

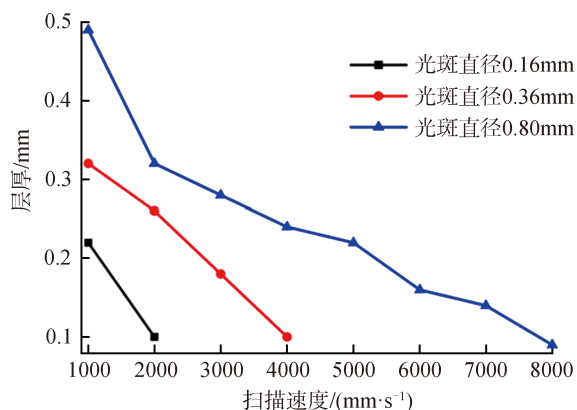


图10 在SLA中相同激光功率下层厚度与不同光斑扫描速度的关系  
Fig.10 Layer thickness versus scanning speed of different spots under same laser power in SLA

粒,具有低熔融温度的黏合剂材料会熔化并流入由非熔融颗粒形成的小孔中。

根据材料的类型, SLS 工艺通常使用  $\text{CO}_2$  和 Yb 光纤激光器<sup>[45-46]</sup>。大多数 SLS 机器通常使用平均功率几十到几百瓦的  $\text{CO}_2$  激光器,因为聚合物在此工作波长下具有高吸收率, Heo<sup>[47]</sup> 的研究表明  $\text{CO}_2$  激光器还可以用于氧化物陶瓷和复合材料的烧结。然而,金属粉末的激光烧结需要 Nd : YAG 激光器或更常见的 Yb 光纤激光器,它们能产生波长为 1064nm 的激光束,该波长更接近于金属粉末的高吸收率范围。这种基于金属的 SLS 工艺也称为直接金属激光烧结(DMLS),以区别于基于聚合物的选区烧结工艺。除金属粉末外, Nd : YAG 和 Yb 光纤激光器还可用于烧结硬质陶瓷<sup>[48]</sup>。波长等许多激光参数也会影响 SLS 打印零件的机械性能和几何形状,其中激光功率和扫描速度是影响烧结过程的主要参数。这两个因素决定了粉末吸收的总能量密度,进而影响了烧结零件的质量。当吸收的能量密度太低时,烧结可能不完全,所得的烧结部件将很脆弱,难以处理,但当吸收的能量密度太高时,烧结的零件将被过量的激光能量损坏,或者零件内部会发生不均匀的熔化,从而在零件打印过程中产生不均匀性,超过材料分解能的激光能量甚至可能导致材料汽化。最佳处理参数随 SLS 中使用的目标材料的类型而变化,能量密度不同所导致材料烧结效率变化可以通过工艺图来表示。图 11 为采用  $\text{CO}_2$  和 Nd : YAG 激光器烧结的不锈钢-铜合金的工艺图<sup>[48]</sup>。不锈钢-铜合金在  $\text{CO}_2$  和 Nd : YAG 激光器的波长下具有不同的能量吸收率,因此需要不同的工艺参数。与使用  $\text{CO}_2$  激光器的情况相比,使用 Nd : YAG 激光器,不锈钢-铜合金具有更大的可激光烧结加工区域,并

且随着能量密度的增加,烧结材料的层厚度通常会增加。

### 3 选区激光熔化(SLM)

SLM 是将激光束入射到金属粉末床上以制造三维零件的过程,与 SLS 相似,激光加工和粉末铺设的重复过程将目标逐层构建为所需的几何形状。在 SLM 中,相对较高功率的激光完全熔化了金属粉末的每一层,而不是烧结粉末<sup>[47]</sup>。SLS 中使用的材料包括各种聚合物以及金属,但 SLM 仅使用某些金属,如钢、钛、铝和合金。与 SLS 工艺类似, SLM 工艺通过使用扫描振镜将激光束定向到指定位置, SLM 和 SLS 之间的主要区别在于颗粒之间的结合过程, SLM 过程主要是粉末颗粒的完全熔化和固化,从而改善了微结构和机械性能,但同时将材料从固体转变为液

体时会存在不稳定性,冷却凝固时亦然<sup>[49]</sup>。激光参数(例如波长、重复率、脉冲持续时间和脉冲能量)会极大地影响熔化和凝固过程,因此对打印零部件的性能产生很大影响。需要根据金属粉末的特性(例如粒径、形状和吸收率)来优化激光参数,以实现良好的粉末结合稳定性和零件孔隙率<sup>[50]</sup>。金属粉末材料吸收率对试验条件非常敏感,例如,在不同的激光功率密度下测试了镍合金粉末相对于时间的吸收率<sup>[51]</sup>,如图 12 所示。利用波长为 1.06 $\mu\text{m}$  的 Nd : YAG 激光器进行了功率密度为 100W/cm<sup>2</sup> 和 250W/cm<sup>2</sup> 两种强度下的测试,由于粉末热物理性质的急剧变化,吸收率迅速提高。在 100W/cm<sup>2</sup> 的温度下,通过表面熔化烧结粉末,并在加工过程中重新排列颗粒,因此吸

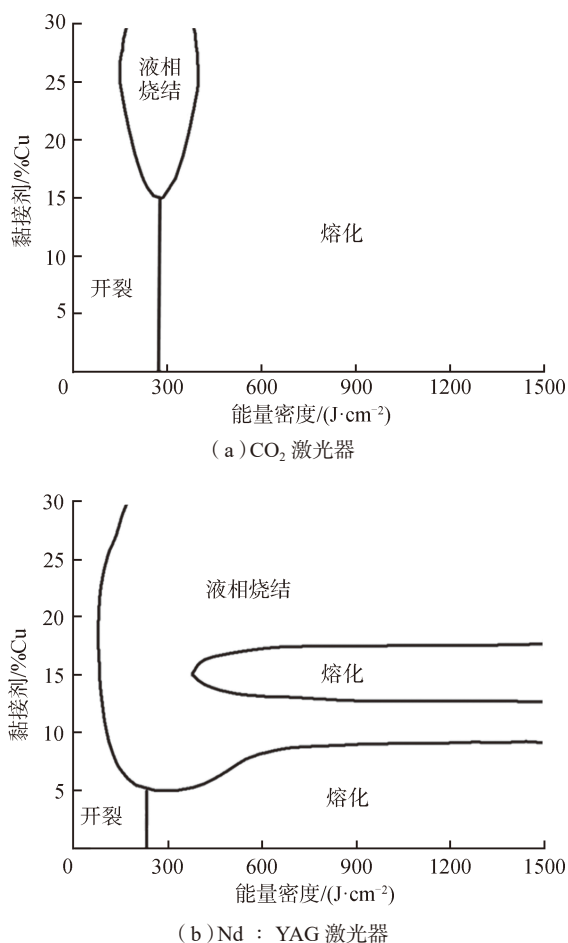


图11  $\text{CO}_2$ 和Nd : YAG激光器烧结的不锈钢-铜的加工工艺

Fig.11 Processing window for stainless steel-Cu sintered by  $\text{CO}_2$  and Nd : YAG laser

收率在热平衡点达到饱和。同时,在  $250\text{W}/\text{cm}^2$  的情况下,长时间加热会引起颗粒的明显熔化,随后由于孔隙率的急剧降低而导致吸收率降低。

在 SLM 工艺中,一般选择波长比  $\text{CO}_2$  激光波长更短的 Nd : YAG 和 Yb 光纤激光器,因为金属颗粒通常在较短的光波长下具有更高的吸收率<sup>[49]</sup>。为了进一步提高铜合金的吸收率,德国弗劳恩霍夫(Fraunhofer)快速制造集团开发了“绿色 SLM”项目<sup>[52]</sup>,采用波长在  $515\text{nm}$  的绿光激光器,该波段激光束能够达到更好的聚焦效果,并将铜的吸收率提高到 70%,使得利用此种光源的 SLM 工艺制造更加精密的部件,图 13 为其采用绿光激光器所打印的铜零件。改善光束质量的激光器具有更高的制造精度,例如薄盘激光器<sup>[53]</sup>,因此,当今大多数商用 SLM 机器都使用 Yb 光纤激光器作光源,从而摆脱了效率较低的  $\text{CO}_2$  激光器。此外,还引入了在单个打印机中使用多个激光器组合的方法,以提高 SLM 的零件质量和打印速度。

#### 4 激光熔覆沉积技术(LENS)

LENS 也是增材制造工艺之一,根据 ASTM 归类为定向能沉积,有时也称为直接光制造(DLF)、直接金属沉积(DMD)、激光金属沉积(LBMD)、激光自由成形制造(LFF)和激光直接铸造等其他术语<sup>[54-55]</sup>。图 14 为典型的 LENS 工艺示意图。在 LENS 中,打印材料通过喷嘴以粉末或金属丝的形式以受控的速率通过喷嘴分配到高功率激光束聚焦的熔池中。通常,整个物料分配系统和激光聚焦模块都安装在多轴机械臂上,可以沿着相同的路径移动。由于系统的灵活性,LENS 还可以用于修复和修补一些设备零部件。当将激光束聚焦到焦平面上的较小点时,在深度方向(靠近焦平面)会有一些范围的激光束,其能量密度足以熔化金

属粉末,形成熔池。焦平面定位、扫描速度、激光功率和进给速度是决定熔池中沉积的厚度和体积的关键参数。熔池的厚度应与 LENS 系统的最小层厚度相匹配,如果熔池的大小不一致,沉积加工的零部件将由于不同层之间熔池厚度不均匀,造成性能下降<sup>[56]</sup>。

#### 5 激光微纳增材制造技术

近年来,超短(皮秒或飞秒)脉

冲激光已经成为微米和纳米粒子烧结过程中的最高效工具。研究表明,皮秒激光可以对纳米粒子进行激光诱导纳米焊接,飞秒激光可以以大于  $3 \times 10^{10}\text{W}/\text{cm}^2$  的强度完全熔化银纳米颗粒(直径  $3\sim 6\text{nm}$ )。在传统热烧结中,银纳米颗粒密集烧结,热烧结所需时间较长(20~60min)会对聚合物基材造成热损伤。激光烧结等光子烧结技术可以通过光热效应烧

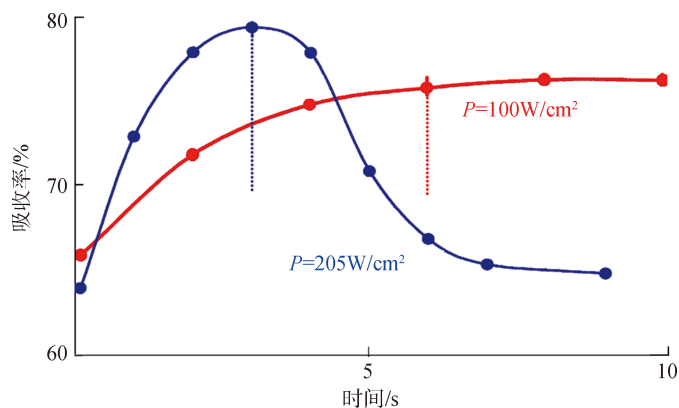


图12 Nd : YAG激光加工时间对Ni合金粉末吸收率的变化

Fig.12 Variation of absorption of Ni-alloy metal powder with Nd : YAG laser processing time

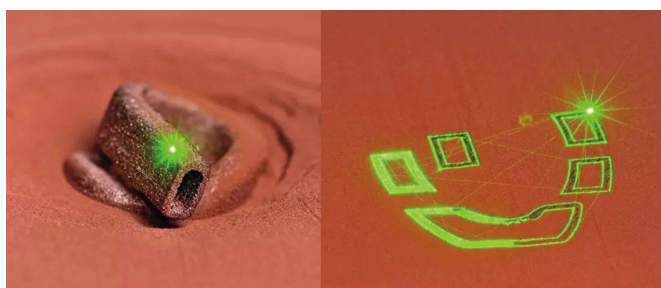


图13 Fraunhofer增材制造研究中心采用新的绿光激光器所打印的铜零件

Fig.13 Copper parts printed by green laser at the Fraunhofer Additive Manufacturing Research Centre

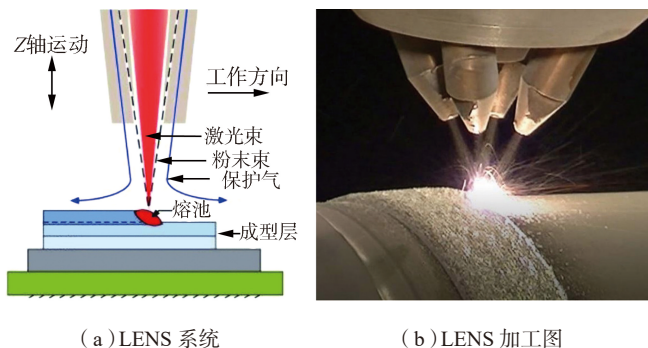


图14 典型的LENS工艺过程示意图

Fig.14 Schematic of a typical LENS process

结金属颗粒,但是,烧结使用脉冲持续时间为几毫秒的光源同样会热损坏柔性基板。此外,强脉冲激光的广谱波长使得难以控制光吸收。然而,Noh等<sup>[57]</sup>将激光的脉冲宽度缩短至飞秒,并将激光的波长调整为特定的颗粒/基材系统可以有效避免热损伤。

采用准分子激光进行纳米粒子烧结,可以实现小型结构的高分辨率数字图案化技术。与长波长激光器相比,通过聚焦受激准分子激光束可以产生较小的光斑,从而可以实现更高的空间分辨率。准分子激光器使用“准分子”作为增益介质,并通过脉冲放电泵浦以在紫外(UV)区域产生纳秒级脉冲。双光子聚合增材制造技术也是目前研究的热点。SLA是使用紫外线激光的单光子聚合过程,它的加工分辨率受到经典光学衍射极限的限制,很难满足高分辨率微纳米结构的加工要求。与SLA不同,使用近红外飞秒激光的双光子聚合增材制造技术可以突破

传统光学衍射的局限,并构造具有任意形状的纳米级高分辨率三维结构<sup>[58]</sup>。

### 商用增材制造设备中激光器

了解增材制造中使用的激光器类型对于理解基于激光的增材制造最新技术至关重要。表2总结了在不同商用增材制造设备中使用的各种激光器。对于不同增材制造工艺,目前所有主流增材制造设备公司均在使用Yb光纤激光器。CO<sub>2</sub>激光器通常用于聚合物粉末的SLS工艺中,而光敏聚合物树脂工艺设备则多采用三倍频的Nd:YVO<sub>4</sub>激光器。当然,新的技术也正在开发中,并适用于各种增材制造技术应用。目前,基于SLA工艺的新型激光技术研发也备受关注,其中包括波长为325nm的He-Cd激光器和波长为364nm的Ar准分子激光器。而飞秒、皮秒激光器由于在3D打印过程中可实现高熔点<sup>[59-60]</sup>或高热扩散率<sup>[61]</sup>材料的加工,其开发应用也越来越多。

### 结论

本文对基于激光的增材制造中使用的各种类型的激光器进行了全面的综述。对其工作原理、光学配置以及各自优势和局限性进行了比较分析得到如下结论:

(1)长期以来CO<sub>2</sub>和Nd:YAG激光器不仅是增材制造的工业力量,而且还因为其高性能和成本效益而成为各种基于激光的制造技术。

(2)Yb光纤激光器具有更高的平均功率,较高的系统稳定性,高水平的参数可调性和较低的维护成本等方面特征,因此正逐渐替代Nd:YAG激光器。

(3)尽管准分子激光器光束质量相对较低且成本较高,但可用于需要高功率UV激光束的增材制造,以用于各种研究目的。

(4)基于激光的增材制造中的可打印材料,精度和生产效率等制造性能,必须根据目标性能选择用于增材制造的激光源。

未来,增材制造将与激光技术保持紧密联系,可以预见,基于激光的增材制造将逐渐取代传统的减材制造技术,或配合传统的制造技术以改善其性能,开发传统制造技术无法实现的新产业应用。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] EY's Global 3D Printing. Executive summary-How will 3D printing make your company the strongest link in the value chain[R]. 2017.
- [3] HERRERA RAMIREZ J M, PEREZ BUSTAMANTE R, ISAZA MERINO C A, et al. Additive manufacturing[M]//Unconventional techniques for the production of light alloys and composites. Cham: Springer International Publishing, 2020.

表2 商用3D打印机中所用的激光器

Table 2 Lasers in various commercial 3D printers

公司	系统	工艺	功率/W	激光器	特点
基于树脂	3D Systems Prox 系列	SLA	高达 1.45	Nd : YVO <sub>4</sub>	较高的吸收系数
	CTC Riverbase 500	SLA	0.3~0.5	Nd : YVO <sub>4</sub>	
基于聚合物粉末	3D Systems sPro 系列	SLS	30~230	CO <sub>2</sub>	高效率,高功率
	EOS EOSINT P 系列	SLS	50	CO <sub>2</sub>	
基于金属粉末	3D Systems ProX DMP 系列	DMP/SLM	500~1000	Yb 光纤	高量子效率,高吸收率
	SLM Solutions SLM HL 系列	SLM	400~1000	Yb 光纤	
	Optomec LENS 系列	LENS/DMD	400~1000	Yb 光纤	
	EOS EOS M 系列	LBMD	200~400	Yb 光纤	
	Matsuura LUMEX Avance 系列	DMD	400~1000	Yb 光纤	
Concept laser LaserCUSING 系列	SLM	100~1000	Yb 光纤		

- [4] 陈继民, 张成宇, 曾勇, 等. 骨科数字化 3D 打印技术及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 120–128.
- CHEN Jimin, ZHANG Chengyu, ZENG Yong, et al. 3D printing technology in orthopedics and its application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 120–128.
- [5] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1–4.
- LU Bingheng, LI Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1–4.
- [6] LEE G, SUL S K, KIM J. Energy-saving method of parallel mechanism by redundant actuation[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2015, 2(4): 345–351.
- [7] YOON H S, KIM M S, JANG K H, et al. Future perspectives of sustainable manufacturing and applications based on research databases[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17(9): 1249–1263.
- [8] 胡婷萍, 高丽敏, 杨海楠. 航空航天用增材制造金属结构件的无损检测研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 70–75, 87.
- HU Tingping, GAO Limin, YANG Hainan. Application of nondestructive testing techniques on additive manufacturing in aerospace fields[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 70–75, 87.
- [9] CRISTOFOLINI I, PILLA M, RAO A, et al. Dimensional and geometrical precision of powder metallurgy parts sintered and sinterhardened at high temperature[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(10): 1735–1742.
- [10] LEE H J, SONG J G, AHN D G. Investigation into the influence of feeding parameters on the formation of the fed-powder layer in a powder bed fusion (PBF) system[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(4): 613–621.
- [11] SUN S, BRANDT M, EASTON M. Powder bed fusion processes[M]//Laser Additive Manufacturing. Amsterdam: Elsevier, 2017: 55–77.
- [12] 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—current situation and future[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 19–23.
- [13] PATEL C K N. Continuous-wave laser action on vibrational-rotational transitions of CO<sub>2</sub>[J]. Physical Review, 1964, 136(5A): a1187.
- [14] BASS M. Laser materials processing[J]. Optics & Laser Technology, 1985, 5(17): 275.
- [15] MAJUMDAR J D, MANNA I. Laser-assisted fabrication of materials[M]. Berlin: Springer, 2012.
- [16] WITTEMAN W J. The CO<sub>2</sub> laser[M]. Berlin: Springer, 2013.
- [17] DIGONNET M, GAETA C, SHAW H. 1.064- and 1.32- $\mu\text{m}$  Nd: YAG single crystal fiber lasers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(4): 454–460.
- [18] MARTELLUCCI S, CHESTER A N, SCHEGGI A M. Laser applications for mechanical industry[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993.
- [19] WEBER R, NEUENSCHWANDER B, WEBER H P. Thermal effects in solid-state laser materials[J]. Optical Materials, 1999, 11(2–3): 245–254.
- [20] 徐贲, 龚华平, 朱周洪. 高精度 DPSS 倍频激光器数字温控系统的设计[J]. 激光杂志, 2009(2): 36–37.
- XU Ben, GONG Huaping, ZHU Zhouhong. Design of high precise temperature controller for DPSS frequency doubling lasers[J]. Laser Journal, 2009(2): 36–37.
- [21] 宇飞. 紫外二极管泵浦固体激光器(DPSS)在工业应用中大展拳脚[J]. 光机电信息, 2005, 22(1): 5–6.
- YU Fei. Ultraviolet DPSS lasers gain industrial strength[J]. OME Information, 2005, 22(1): 5–6.
- [22] GARG A, LAM J S L, SAVALANI M M. Laser power based surface characteristics models for 3-D printing process[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2018, 29(6): 1191–1202.
- [23] DUTTA N K. Fiber amplifiers and fiber lasers[M]. Singapore: World Scientific, 2014.
- [24] BRIGNON A. Coherent laser beam combining[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [25] ORLAN H. Marking with fiber lasers[R/OL]. [2020-08-01]. <http://www.industrialasers.com/articles/print/volume-19/issue-5/features/markings-with-fiber-lasers.html>.
- [26] BASTING D, PIPPERT K D, STAMM U. History and Future Prospects of Excimer Lasers[C]//Proceedings of 2nd International Symposium on Laser Precision Micromachining, Singapore, 2001.
- [27] WANG X, SHAO J Z, LI H, et al. Analysis of damage threshold of K9 glass irradiated by 248-nm KrF excimer laser[J]. Optical Engineering, 2016, 55(2): 027102.
- [28] OLAKANMI E O, COCHRANE R F, DALGARNO K W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties[J]. Progress in Materials Science, 2015, 74: 401–477.
- [29] SING S L, YEONG W Y, WIRIA F E, et al. Direct selective laser sintering and melting of ceramics: A review[J]. Rapid Prototyping Journal, 2017, 23(3): 611–623.
- [30] GU D D, MEINERS W, WISSENBACH K, et al. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms[J]. International Materials Reviews, 2012, 57(3): 133–164.
- [31] LAZOV L, ANGELOV N. Physical model about laser impact on metals and alloys[J]. Contemporary Materials, 2010, 1: 124–128.
- [32] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: A review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917–1928.
- [33] 蒋三生. 基于 SLA 成型的光敏树脂 3D 打印工艺及性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(1): 76–81.
- JIANG Sansheng. The technology and performance of PHOTOSensitive resin 3D printing based on SLA[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1): 76–81.
- [34] SAHASRABUDHE H, BANDYOPADHYAY A. Additive manufacturing of reactive in situ Zr based ultra-high temperature ceramic composites[J]. Journal of Metals, 2016, 68(3): 822–830.
- [35] MUMTAZ D K A, HOPKINSON D N. Selective laser melting of inconel 625 using pulse shaping[J]. Rapid Prototyping Journal, 2010, 16(4): 10.1108/13552541080000463.
- [36] PASCHOTTA R. M2 factor[R/OL]. [2020-08-01]. <http://www.rp-photonics.com/m2-factor.html>.
- [37] MONZÓN M D, ORTEGA Z, MARTÍNEZ A, et al. Standardization in additive manufacturing: Activities carried out by international organizations and projects[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(5–8): 1111–1121.
- [38] HULL C W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography: US4575330 [P]. 1986.
- [39] WANG J C. A novel fabrication method of high strength alumina ceramic parts based on solvent-based slurry stereolithography and sintering[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(3): 485–491.
- [40] VEHSE M, SEITZ H. A new micro-stereolithography-system based on diode

- laser curing (DLC)[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(10): 2161–2166.
- [41] CAO Y, LI D C, WU J. Using variable beam spot scanning to improve the efficiency of stereolithography process[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2013, 19(2): 100–110.
- [42] LEE I H, CHO D W. Micro-stereolithography photopolymer solidification patterns for various laser beam exposure conditions[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, 22(5–6): 410–416.
- [43] CORBELS, DUFAUD O, ROQUES-CARMES T. *Materials for stereolithography*[M]//*Stereolithography*. Boston: Springer, 2011: 141–159.
- [44] BEAMAN J J, DECKARD C R. Selective laser sintering with assisted powder handling: US4938816[P]. 1990.
- [45] LIU F H, SHEN Y K, LEE J L. Selective laser sintering of a hydroxyapatite-silica scaffold on cultured MG63 osteoblasts in vitro[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(3): 439–444.
- [46] LEE P H, CHANG E, YU S, et al. Modification and characteristics of biodegradable polymer suitable for selective laser sintering[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(6): 1079–1086.
- [47] HEO J, MIN H, LEE M. Laser micromachining of permalloy for fine metal mask[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing—Green Technology*, 2015, 2(3): 225–230.
- [48] KRUTH J P, WANG X, LAOUI T, et al. Lasers and materials in selective laser sintering[J]. *Assembly Automation*, 2003, 23(4): 357–371.
- [49] GIBSON I, ROSEN D W, STUCKER B. *Design for additive manufacturing*[M]//*Additive Manufacturing Technologies*. Boston: Springer, 2010: 299–332.
- [50] KRUTH J P, VANDENBROUCKE B, VAERENBERGH J V, et al. Benchmarking of different SLS/SLM processes as Rapid Manufacturing techniques[C]//*Poymers & Moulds Innovations (PMI)*. Belgium, 2005.
- [51] 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.
- [52] HAUBOLD M, GANSER A, EDER T, et al. Laser welding of copper using a high power disc laser at green wavelength[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 446–449.
- [53] DASHCHENKO A I. *Manufacturing technologies for machines of the future*[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [54] AHN D G. Direct metal additive manufacturing processes and their sustainable applications for green technology: A review[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing—Green Technology*, 2016, 3(4): 381–395.
- [55] KHADEMZADEH S, PARVIN N, BARIANI P F. Production of NiTi alloy by direct metal deposition of mechanically alloyed powder mixtures[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16(11): 2333–2338.
- [56] DWIVEDI R, KOVACEVIC R. Process planning for multi-directional laser-based direct metal deposition[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2005, 219(7): 695–707.
- [57] NOH J, HA J, KIM D. Femtosecond and nanosecond laser sintering of silver nanoparticles on a flexible substrate[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 511: 145574.
- [58] 杨栋, 刘力谱, 杨宏, 等. 激光微纳三维打印[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011411.
- YANG Dong, LIU Lipu, YANG Hong, et al. Laser micro-nano three-dimensional printing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011411.
- [59] BAI S, YANG L, LIU J. Manipulation of microstructure in laser additive manufacturing[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(5): 495.
- [60] NIE B, HUANG H, BAI S, et al. Femtosecond laser melting and resolidifying of high-temperature powder materials[J]. *Applied Physics A*, 2015, 118(1): 37–41.
- [61] CHENG C W, CHEN J K. Femtosecond laser sintering of copper nanoparticles[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(4): 289.

通讯作者: 陈继民, E-mail: jimmin@bjut.edu.cn.

## Application of Lasers in Additive Manufacturing

CHEN Jimin<sup>1,2</sup>, ZHANG Chengyu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Digital Medical 3D Printing Research Center, Beijing 100124, China)

**[ABSTRACT]** In order to fully understand the influence of laser on additive manufacturing, the types of lasers widely used in additive manufacturing were reviewed, and important parameters related to additive manufacturing were analyzed for each type of laser. In addition, the advantages and limitations of each laser in additive manufacturing were inspected. For each additive manufacturing method, the latest progress of applicable lasers was introduced. The future of laser-based additive manufacturing was discussed at the end. Conclusion: CO<sub>2</sub> and Nd:YAG lasers are still the backbone of various manufacturing technologies; Yb-fiber lasers have advantages such as higher average power, system stability, high parameter tunability, and low maintenance costs, and are gradually replacing Nd:YAG Lasers; although excimer lasers have relatively low beam quality and high cost, they can still be used for additive manufacturing that requires high-power UV laser beams; laser-based additive manufacturing must choose a laser source for additive manufacturing based on target performance.

**Keywords:** Additive manufacturing; 3D printing; Stereo-lithography; Selective laser sintering; Selective laser melting; Direct metal laser sintering

(责编 阳光)