



金属材料增材制造技术

黄春平 黄硕文 刘奋成

机械加工的分类方式有多种,按被加工材料的增减可分为减材制造和增材制造。本文将针对金属材料的增材制造技术进行阐述。根据所利用的热源不同,金属增材制造主要分为激光、电子束、电弧法和金属固相增材制造技术等。

1. 激光增材制造技术

激光增材制造(LAM)技术是一种兼顾精确成形和高性能成性需求的一体化制造技术。包括以同步材料送进为主要技术特征的激光立体成形技术(LSF)和以粉末床为主要技术特征的选区激光熔化技术(SLM)。其中LSF技术可以实现力学性能与锻件相当的复杂高性能构件的高效率制造,并且成形尺寸基本不受限制(取决于设备运动幅面),同时LSF技术所具有的同步材料送进特征,还可以实现同一构件上多材料的任意复合和梯度结构制造,便于进行新型合金设计,并可用于损伤构件的高性能成形修复。SLM技术则可以实现力学性能优于铸件的高复杂性构件的直接制造,但是通常成形尺寸较小,只能进行单种材料的直接成

形。另外,SLM技术的沉积效率要比LSF技术低一个数量级,但成形件的复杂性基本不受限制。以同步材料送进为主要技术特征的激光立体成形技术(LSF)还可方便地同传统的加工技术,如锻造、铸造、机械加工或电化学加工等等材或减材加工技术相结合,充分发挥各种增材与等材及减材加工技术的优势,形成金属结构件的整体高性能、高效率、低成本成形和修复新技术。

高性能金属构件增材制造技术的发展史可追溯到20世纪70年代末期关于激光熔覆技术的研究。1979年,美国联合技术公司的Snow等针对高温合金涡轮盘的制造难题,发展了同步送粉激光熔覆方法,采用LSF方法制造了径向对称镍基高温合金零件,并取得了相关专利。不过受限于当时的计算机技术水平,当时的激光增材制造技术还只能制造一些板型件或回转件。直到2000年,美国波音公司首先宣布采用LSF技术制造的3个Ti-6Al-4V合金零件在F-22和F/A-18E/F飞机上获得应用,才在全球掀起了金属零件的直接增材制造的第一次热潮。实际上,从20世纪90年代开

始,随着计算机技术的迅速发展以及快速原型技术的逐渐成熟,LSF技术逐渐成为国际先进材料加工领域研究的热点,并迅速进入高速发展阶段,吸引了众多著名的研究机构参与其中。研究内容日益系统化,在新材料和新技术的研发与商业应用方面均取得了卓有成效的业绩。

目前,LSF技术所应用的材料已涵盖钛合金、镍基高温合金、铁基合金、铝合金、难熔合金、非晶合金以及梯度材料等。不过,目前钛合金的LSF技术最为成熟,其他合金LSF技术的成熟度远不如钛合金。同时,LSF过程中尽管成形效率高,但通常成形件的表面较为粗糙,需要进行进一步的加工。另外,LSF过程中一般无支撑结构,同时所采用的激光束斑尺寸较大,因此成形复杂程度与铸件相比还有一定差距。特别是对于大型构件的LSF,如何有效地控制内部应力分布和变形仍然是一个亟待解决的问题。至于SLM技术,这项技术实际上是在德克萨斯大学奥斯汀分校的Deckard所发明的基于粉末床的选区激光烧结(SLS)技术上发展起来的。1995年,德

国Fraunhofer应用研究促进协会ILT激光技术研究所的Meiners等和日本大阪大学的Abe等为了解决SLS过程中粉末的连接强度不高的问题,提高材料致密度,提出了基于粉末激光熔凝的SLM技术构思。不过受限于粉末在成形过程中易出现的部分熔化现象,以及粉末在熔化后易发生的球化问题,SLM技术早期成形构件的致密度和强度并不太高,直到2010年前后,随着工艺的优化部分金属材料致密度显著提高,SLM技术才在有限的几种典型钛合金、高温合金、钢、铝合金材料致密度方面取得重要突破,并随着SLM装备的快速商业化,开始应用于医学、汽车和航空领域。由于SLM装备是在SLS装备的基础上进行的进一步开发,因此目前的装备成熟度较高。同时,SLM过程中激光的束斑尺寸较小,粉末床中易于构造支撑结构,因此成形的构件复杂程度较高,而且表面粗糙度接近铸件。目前美国材料与试验协会(ASTM)发布相关的增材制造标准大部分是针对SLM成形的。不过,目前SLM成形制造构件的尺寸较小,而且粉末熔化易发生球化,使得目前SLM成形的构件内部难以避免有一些微小孔洞,对其疲劳性能有一定损伤。由于SLM成形对工艺控制相对要求较为苛刻,目前适用于SLM成形的材料种类还较少。另外,对于大型构件的SLM成形,由于难以在粉末床中获得均匀的温度场,如何有效地控制应力分布和构件变形同样是一个关键问题。成形尺寸的增大还将导致未熔残

留粉末数量的急剧增加。因此,如何提高粉末的有效利用率及再利用率也是一个必须解决的重要问题。图1为LSF制备的典型零件。

LSF技术包括送粉式和送丝式两种技术路径,其中国内外研究以送粉式为主,但存在的不足如粉末的利用率很低(20%~30%)、粉末的污染问题、粉末相对昂贵的价格等。而送丝式激光增材制造不仅材料利用率很高(几乎100%),更加具有经济性。2008年,英国的Sui Him Mok等采用半导体激光器熔丝制备了Ti-6Al-4V钛合金,作者首先研究了送丝方向和角度、激光功率、扫描速度、送丝速度等对单道成形的影响。研究表明,在前送丝、送丝角度为 45° 时单道成形最好,送丝速度能达到2m/min,沉积效率能达到1kg/h。单道沉积层的宽度主要取决于激光功率,而高度主要取决于扫描速度。随后,作者进行了多层沉积试验,每沉积完一层等到温度降到 60°C 以下再沉积下一层。研究表明,柱状晶晶粒的大小能达到 $11\text{mm}\times 3\text{mm}$,层带内组织为粗大的魏氏组织,而层带间的组织为细小的网篮状的魏氏组织。另外,不同参数下的硬度值相差不超过10%,在相同的功率下,扫描速度越高硬度稍微变大。并且 700°C 消除应力处理后,强度和塑性都降低。沉积态抗拉强度和屈服强度分别为987MPa和942MPa,而塑性在10.5%~15.5%。同时,研究发现性能更主要取决于拉伸方向,而跟参数的影响不大,不同参数

下的力学性能相差不大,因而送丝式激光增材制造提供了更宽泛的工艺窗口。但多个研究发现送丝式激光增材制造存在一些突出性的工艺难点,如光丝对中性、氧化保护、粘丝、丝的球化等问题。由于丝的刚性扰动和丝与光的对中性要求比较苛刻,因而容易出现丝和光的微小偏离,从而使侧壁成形不平直,出现了弯曲,影响表面成形精度。

2. 电子束增材制造技术

电子束增材制造技术主要包括电子束熔丝沉积成形技术和电子束选区熔化技术。电子束熔丝沉积技术是在真空环境中,高能量密度的电子束轰击金属表面形成熔池,金属丝材通过送丝装置送入熔池并熔化,同时熔池按照预先规划的路径运动,金属材料逐层凝固堆积,形成致密的冶金结合,直至制造出金属零件或毛坯,其原理如图2所示。

电子束熔丝沉积技术的优点主要表现在沉积效率高(沉积速率可达 15kg/h)和真空环境下有利于零件的保护。2002年,美国航空航天局兰利研究中心的



图1 激光增材制造典型零件

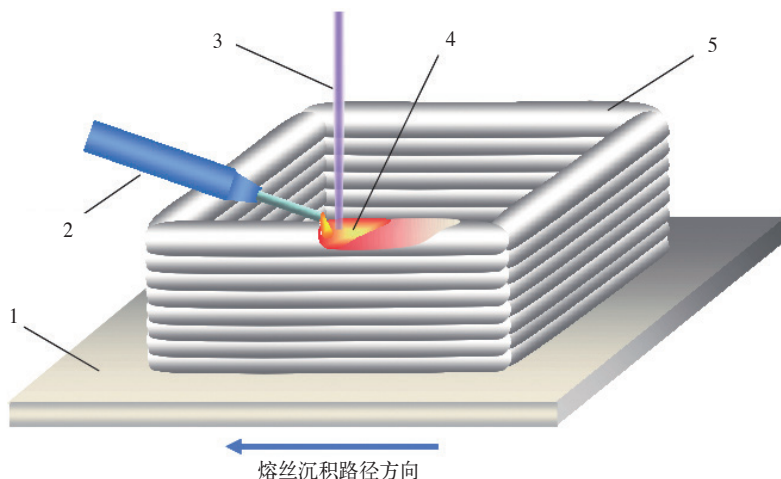


图2 电子束熔丝沉积成形原理

1.基板 2.送丝装置 3.电子束 4.熔池 5.沉积金属

K.M. Taminger 等人提出了EBF3技术，重点开展了微重力条件下的成形技术研究。同一时期，美国Sciaky公司联合 Lockheed Martin及Boeing 公司等合作致力于大型航空金属零件的制造。Lockheed Martin公司选定了 F-35飞机的襟副翼梁，准备用电子束熔丝沉积成形代替锻造，预期零件成本降低30%~60%。2007年美国CTC公司针对海军无人战斗机计划，制定了“无人战机金属制造技术提升计划”，选定电子束熔丝沉积成形技术作为未来大型结构低成本高效制造的方案。目标是将无人机金属结构的重量和成本降低35%。中航工业北京航空制造工程研究所于2006年开始电子束熔丝沉积技术的研究，所制备的TC4、TA15、TC11、TC18、TC21等钛合金以及A100超高强度钢的电子束熔丝沉积成形件力学性能如附表所示。图3为其研制的钛合金零件和试验件。2012年采用电子束熔丝沉积成形制造的钛合金零件在国内飞机结构上率先实现了装机应

用。

电子束选区熔化技术是指电子束在偏转线圈驱动下按预先规划的路径扫描，熔化预先铺放的金属粉末，完成一个层面的扫描后，工作舱下降一层高度，铺粉器重新铺放一层粉末，如此反复进行，层层堆积，直到制造出需要的金属零件，整个加工过程均处于10~2Pa以下的真空环境中，能有效避免空气中有害杂质的影响，其原理如图4所示。电子束选区熔化技术源于20世纪90

年代初期的瑞典，瑞典Chalmers工业大学与Arcam公司合作开发了电子束选区熔化快速成形（EBM）技术，并申请了专利。2003年，Arcam公司独立开发了EBM设备。目前以制造EBM设备为主，产品已成系列，兼顾成形技术开发。近年来，在航空航天领域的应用迅速兴起，美国波音公司、Synergeering group公司、CalRAM公司、意大利Avio公司等针对火箭发动机喷管、承力支座、起落架零件、发动机叶片等开展了大量研究，有的已批量应用，材料主要为铜合金、Ti-6Al-4V、TiAl合金等。由于材料对电子束能量的吸收率高且稳定，因此，电子束选区熔化技术可以加工一些特殊合金材料。电子束选区熔化技术可用于航空发动机或导弹用小型发动机多联叶片、整体叶盘、机匣、增压涡轮、散热器、飞行器筋板结构、支座、吊耳及框梁起落架结构的制造，其共同特点是结构复杂，用传统方法加工困难，甚至无法加工。其局限在于只能加工小型零件。目前世界上最大的电

电子束熔丝沉积电子束成形材料的力学性能及与锻件标准的对比

材料牌号	L方向取样	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)	a_K /J·cm ⁻²
TC4	电子束成形	≥942	≥853	≥8.5	≥37	≥60
	HB5432—1989	≥895	≥825	≥10	≥30	≥35
TC18	电子束成形	1067~1180	≥1005	≥5.5	≥13.5	≥22
	协上五高	1080~1280	≥1010	≥7	≥16	≥25
TA15	电子束成形	≥960	≥835	≥9	≥31	≥51
	11-CL-059B-2001	930~1130	≥855	≥10	≥25	≥40
A100	电子束成形	≥1945	≥1675	≥11	≥56.5	≥65
	抚钢QJ/DTOL.53039-2008	≥1930	≥1620	≥10	≥55	≥53



图3 电子束熔丝沉积成形典型零件



子束选区熔化设备是Arcam公司的A2XX型设备有效加工范围为 $\phi 350\text{mm} \times 380\text{mm}$ 。

近年来,西北有色金属研究总院、中科院金属研究所、北京航空航天大学等单位利用Arcam公司生产的设备开展了研究,涉及多孔材料、医学应用等领域。中航工业北京航空制造工程研究所针对航空应用开展了钛合金、TiAl合金的电子束选区熔化研究,针对飞行器结构轻量化需求,重点研究了钛合金的力学性能及空间点阵结构的承载性能和变形失效行为,目前正进行飞机复杂钛合金接头及TiAl叶片的电子束选区熔化技术研究,研制的钛合金结构件如图5所示。

3. 电弧增材制造技术

电弧增材制造(WAAM)是一种利用逐层熔覆原理,采用熔化极惰性气体保护焊接(MIG)、钨极惰性气体保护焊接(TIG)以及等离子体焊接电源(PA)等焊机产生的电弧为热源,通过丝材的添加,在程序的控制下,根据三维数字模型由线-面-体逐渐成形出金属零件的先进数字化制造技术。它不仅具有

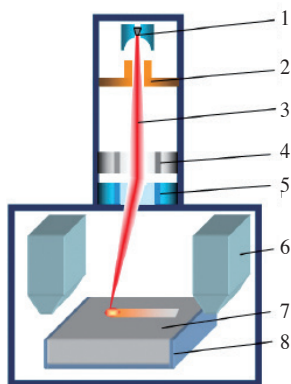


图4 电子束选区熔化技术

1.阴极 2.阳极 3.电子束 4.聚焦线圈
5.偏摆线圈 6.储粉仓 7.金属粉末 8.工具箱

沉积效率高;丝材利用率高;整体制造周期短、成本低;对零件尺寸限制少;易于修复零件等优点,还具有原位复合制造以及成形大尺寸零件的能力。较传统的铸造、锻造技术和其他增材制造技术具有一定先进性,与铸造、锻造工艺相比,它无需模具,整体制造周期短,柔性程度高,能够实现数字化、智能化和并行化制造,对设计的响应快,特别适合于小批量、多品种产品的制造。WAAM技术比铸造技术制造材料的显微组织及力学性能优异;比锻造技术产品节约原材料,尤其是贵金属材料。与以激光和电子束为热源的增材制造技术相比,它具有沉积速率高、制造成本低等优势。与以激光为热源的增材制造技术相比,它对金属材质不敏感,可以成形对激光反射率高的材质,如铝合金、铜合金等。与SLM技术和电子束增材制造技术相比,WAAM技术还具有制造零件尺寸不受设备成形缸和真空室尺寸限制的优点。

图6为电弧增材制造典型零件。

近年来在电弧增材制造技术的研究中,研究者开始将低热输入高效焊接热源引入到电弧增材制造系统中,取得了一些突出的成绩。哈尔滨工业大学姜云禄、

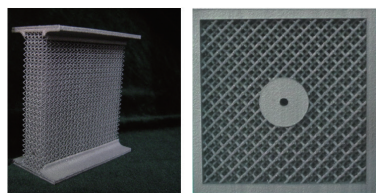


图5 电子束选区熔化制备的钛合金结构件

北京航空航天大学从保强等人将冷金属过渡(CMT)技术用于铝合金电弧熔丝增材制造技术中,通过控制工艺可以消除气孔。CMT的工艺具有高熔敷效率、低热输入和无飞溅等特点,目前该技术已发展具有常规CMT、脉冲CMT(CMT-P)、变极性CMT(CMT-ADV)和变极性复合脉冲CMT(CMT-PADV)控制模式。哈尔滨工业大学苗玉刚等人建立了旁路分流MIG焊电弧增材制造系统,认为该系统不仅具有熔敷速度快、沉积效率高等,还具有热输入低、成形精度高等优势,既可实现同种材料的增材制造,如钛、钢、铝和铜等,又能够用异种金属结构的电弧增材,如铝/钢、铝/钛等。

4. 固相增材制造技术

以高能束流为热源的金属熔化增材制造技术在制备钛合金、高温合金等材料方面有很大的技术优势,但对铝合金、铜合金等材料存在一个很大的技术壁垒——能量的吸收率极低,这限制了高能束增材制造技术在铝合金、铜合金制造领域的应用。为了满足这一类材料的需要,研究者结合固相焊接技术方法,提出了一些固相增材制造技术。

南昌航空大学柯黎明教授团队将搅拌摩擦搭接焊技术引入金属增材制造中,并将该方法命名为搅拌摩擦增材制造(FSAM)。团队研制了专用于FSAM的无倾角搅拌头,进行铝合金搅拌摩擦增材制造实验,研究工艺参数对搅拌摩擦增材成形的影响,包括进给速度、水平增材间距和增材方向等。对7075高强铝合金进

行FSAM, 成形件最大抗拉强度可达278MPa。图7为7075铝合金FSAM成形横截面形貌图。

印度J. John Samuel Dilip等人采用200kN的摩擦焊设备进行304不锈钢的摩擦增材制造, 单层增材厚度为1~2mm, 获得了一个50mm高的 $\phi 20$ mm的棒料(见图8), 成形件的抗拉强度、屈服强度均与基材相当。日本Shimizu等人采用高功率超声波增材制造系统对原材料为0.15mm的6061铝箔进行31层加工, 选择的5.6kN正压力、超声波频率为20kHz, 制得外形尺寸为24.5 mm(宽) $\times$ 170 mm(长) $\times$ 4.65 mm(厚)的试样。美国Ohio

州立大学Chen等人采用超声波增材制造技术将NiTi形状记忆合金植入铝中, 制成复合材料(见图9)。

参考文献:

- [1] 林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(9): 1111-1126.
- [2] 巩水利, 锁红波, 李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术, 2013, (13): 66-71.
- [3] 田彩兰, 等. 国外电弧增材制造技术的研究现状及展望[J]. 航天制造技术, 2015(2):

57-60.

- [4] 姜云禄. 基于冷金属过渡技术的铝合金快速成形技术及工艺研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [5] 从保强, 丁佳洛. CMT工艺对Al-Cu合金电弧增材制造气孔的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(12): 3149-3153.
- [6] 苗玉刚, 等. 基于BC-MIG焊的铝/钢异种金属增材制造工艺[J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 5-8.
- [7] 王忻凯, 等. 工艺参数对铝合金搅拌摩擦增材制造成形的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(5): 8-12.
- [8] Yuqing, M., Liming K., Chunping H, et al. Formation characteristic, microstructure, and mechanical performances of aluminum-based components by friction stir additive manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, DOI 10.1007/s00170-015-7695-9.

【基金项目】国家自然科学基金(51465044); 江西省高等学校科技落地计划(KJLD12074、13055)。

作者简介: 黄春平, 南昌航空大学焊接工程系副教授、硕士生导师; 黄硕文, 刘奋成, 南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室。

MW 20160110



图6 机器人GMAW快速成形制造系统的成形件

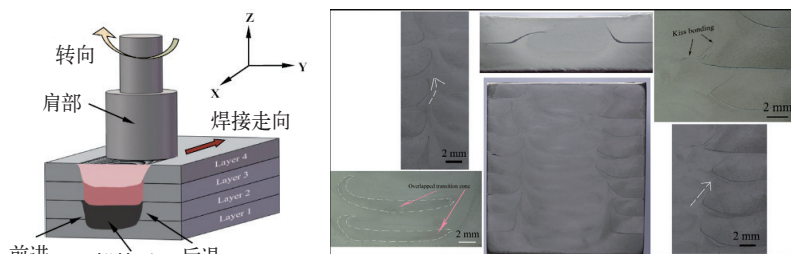


图7 搅拌摩擦增材制造原理图及7075铝合金FSAM件截面形貌



图8 摩擦增材制造试样宏观形貌

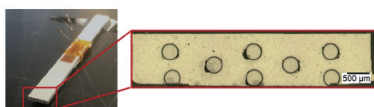


图9 超声波增材制造制备TiNi/Al复合材料