

金属零件 3D 打印技术研究进展

赵高升 刘秀军* 张志明 张庆印

(天津工业大学环境与化学工程学院, 天津 300387)

摘 要 金属零件 3D 打印技术是整个 3D 打印体系中最前沿和最具有潜力的技术,是增材制造的重要发展方向。简述了 3D 打印工艺中适用于金属材料的工艺,主要包括选择性激光烧结(SLS)技术、选择性激光熔化(SLM)技术、选择性激光熔覆(SLC)技术、层叠法成型(LOM)技术、电子束熔覆技术。讨论了各工艺特征、存在问题以及研究进展。

关键词 3D 打印, 金属零件, 选择性激光烧结, 电子束熔覆

Research progress of metal part manufactured by 3D printing

Zhao Gaosheng Liu Xiujun Zhang Zhiming Zhang Qingyin

(School of Environmental and Chemical Engineering, Tianjin Polytechnic University,
Tianjin 300387)

Abstract The metal part 3D printing technology is the most cutting-edge and the most potential technology in the entire 3D printing system, the metal parts 3D printing technologies are the main trend of increasing material manufacturing. 3D printing technologies were suitable for metallic materials, and mainly including Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Cladding (SLC), Laminated Object Manufacturing (LOM) and electron beam cladding technology were presented. The features was not only discussed, but also involved the existing problems and the research progress of these technologies.

Key words 3D printing, metal part, selective laser sintering, electron beam cladding

3D 打印是根据所设计的 3D 模型,通过 3D 打印设备逐层增加材料来制造三维制品的技术^[1-3]。随着科技发展及推广应用的需求,越来越多的金属零件 3D 打印技术得到发展。3D 打印工艺中适合于金属材料的工艺主要包括选择性激光烧结(SLS)技术、选择性激光熔化(SLM)技术、选择性激光熔覆(SLC)技术、层叠法成型(LOM)技术、电子束熔覆技术。近年来,3D 金属打印技术在金属打印材料、打印工艺条件、辅助处理等方面进行了大量研究,金属 3D 打印机已进入市场化制造,目前已有商业化金属 3D 打印机问世。简述了适合于金属 3D 打印的工艺,讨论了各个工艺特征、存在问题以及研究进展。

1 SLS 工艺特征及其研究进展

SLS 工艺具有的主要优越性^[4-6]表现在:(1)能生产强度高、材料属性优异的零件,在生产大而复杂的零件时,无需其他工具或额外工序,并可以直接获

得终端产品,也能够制造出使用传统方法难以制造的其他材料零件;(2)无需设计和构造支撑部件,悬臂和咬边由固体粉材床支撑;(3)零件制造省时、经济、环境友好。但 SLS 工艺仍存在一些问题^[7-9]:(1)打印过程需控制恒定的温度,打印前后需预热和冷却;(2)打印全封闭零件需要留有孔洞除去粉材;(3)与传统制造过程相比,耗能高,能量利用率低,需要专门的实验室环境;(4)存在层变形、微结构聚集、“球化”效应现象,熔池中金属熔化时浮升表面的渣滓会引起表面粗糙,影响打印精度。

Lykov 等^[10]提出了一种获得用于 SLS 工艺的超细复合粉末的方法,该方法包括由气体喷嘴喷射的液态金属的雾化和在纳米级碳粉存在下于行星搅拌器中对超细粉进行处理,该方法使生产适用于 SLS 工艺的复合粉成为可能。Olakanmi^[6-7]利用 SLS 工艺对纯铝粉末、铝镁合金粉末和铝硅合金粉末进行了工艺条件的研究。Amorim 等^[11]通过减少激光扫描速度来获得由复合金属材料烧结而成的

基金项目:国家自然科学基金(21476172)

作者简介:赵高升(1989-),男,硕士,研究方向为 3D 打印材料。

联系人:刘秀军,男,教授,研究方向为 3D 打印材料和碳材料。

密集结构部件。Xie 等^[12]研究了由 SLS 成型的多孔 316L 不锈钢的力学性质和结构。根据目前针对 SLS 技术的研究可以看出,未来 SLS 技术在金属材料领域中的研究方向集中在先进金属材料的激光烧结成型、金属零件及合金材料零件的烧结成型。能量分析与优化方面,集中在其他参数不变的条件下,激光速度、激光功率、粉末大小和粉末温度等对 SLS 过程的影响。如 Xu 等^[13]开发了一种用于快速制造工艺类型选择和评估的模型,这些研究所得结论仅适用于各自的材料设备,并不适用于所用的设备。Paul 等^[14]提出了一种使用 SLS 工艺制造简单零件所需激光能量的数学分析方法和一种计算使用 SLS 工艺最小烧结总面积及能量的优化模型。Wang 等^[15]研究了一种基于带有可移动激光束的金属激光烧结的三维数值非平衡态热模型。这些研究结果只适用于简单零件,未来应集中于研究多种组分、多因素且适用于复杂零件和带孔零件的能量计算模型,从而为节能提供合理的依据。随着科技的发展和我国对 3D 打印的着力发展,各种金属材料的最佳烧结参数得以获得,激光烧结金属粉末成形机理得到普及,相信对 SLS 技术的研究及应用将使 SLS 技术迎来新的发展机遇。

2 SLM 工艺特征及其研究进展

SLM 工艺特征^[16-17]主要包括:(1)适合于制造各种复杂形状的金属部件,特别是用传统机械加工方法无法制造的复杂部件;(2)可以将 CAD 模型直接制造出终端金属产品,仅需简单的后处理,具有较高的灵活性;(3)制造出来的金属零件具有很高的尺寸精度和较光滑的表面;(4)激光光斑能以较低的功率熔化高熔点金属,所以可以使用单一成分的金属粉末制造金属零件,可选用的金属粉末种类大大增加;(5)生产周期短,材料利用率高,零件生产不需要昂贵的模具。

用单一成分且不含任何添加剂的金属粉末来制造高密度金属部件,金属粉末必须完全熔化,如果仅部分熔化,较高的表面张力会导致球化效应,从而出现空洞区,进而导致成型金属零件强度低和表面粗糙,不能满足工业需要。Miranda 等^[18]研究了 SLM 工艺参数(激光功率、扫描速度和扫描间距)对 316L 不锈钢密度、硬度和抗剪强度的影响,利用方差分析方法评估工艺参数对上述性质的影响。Masoudi 等^[19]开发了一种研究激光、粉末和气氛在不同条件下相互作用的三维数学模型,该模型涉及到基本参

数(激光束特征、能量分布、粉层特征、气氛性质和压力以及其他工艺参数)。未来人们会进一步综合研究涉及到的各种工艺条件对金属零件的影响,从而对其进行优化。

SLM 广泛应用于机械、生物医疗、电子、航空航天领域,特别是在航空航天领域,主要应用于多品种小批量生产过程。Song 等^[20]研究了工艺参数对铁零件致密性的影响,在激光功率为 100W,不同激光扫描速度可以得到高致密性的铁零件。Jia 等^[21]综合研究了由 SLM 制造生产的 718 铬镍铁合金部件的致密化、微观结构特征、硬度、耐磨性能。在激光能量密度低的情况下出现“球化”现象,导致成型金属零件相对密度降低。对于每一种新材料,为了避免“球化”现象、成品体积收缩变形、裂纹、致密化程度低、表面粗糙等问题,都需重新确定最佳工艺参数,所以现在商用的 SLM 金属材料仍然有限。SLM 大部分研究围绕铁、钛和铝 3 种类型金属,对其他金属研究比较少,SLM 设备昂贵、工作效率低、工艺软件不完善、制件翘曲变形大,只能制造一些小的金属部件。近年来人们正着力解决以上问题,SLM 工艺技术在将来会得到更好、更快的发展。

3 SLC 技术工艺特征及其研究进展

SLC 技术具有成型零件复杂、结构优化、性能优良,粉末利用率高、可实现梯度功能、柔性化程度高等独特优点,可以成型具有复杂内腔和悬臂特征的金属零件,且不需要支撑。如 Durejko 等^[22]通过 SLC 技术获得 Fe3Al/SS316L 梯度功能薄壁管。

Jeng 等^[23]通过 SLC 制作金属模型,而后用铣削修复后处理。激光熔覆成型效率较低,成型质量和精度处于比较低的水平,制成的金属零件大部分属于近形部件,还需进行机械加工后处理才能使用。粉末进料器应重新设计优化进而提高金属零件的精度,若 SLC 系统精度进一步提高,直接制造终端金属零件是很有可能。于承雪等^[24]分析了裂纹产生的机理并阐述了熔覆裂纹的影响因素和控制方法。SLC 技术最棘手的问题就是裂纹的控制问题。裂纹的产生与工艺因素、材料因素等密切相关,影响因素多、控制难度较高。要大力发展 SLC 技术,推进其工业化进程,裂纹控制问题急需解决,需要综合考虑各方面因素,利用现代高科技手段加以解决。Liu 等^[25]研究了用 SLC 技术对高温镍基合金涡轮部件进行修复,对破损零件进行了形状及功能修复,提高了部件使用寿命等。但目前工艺研究不够系统

化,因此需加强其在金属零件修复方面的研究和应用,最终确定最佳的工艺条件,使工艺系统化。金属粉末多为特制粉末,通用性较低、价格贵,设计和开发新型金属材料以适合其工艺要求,满足实际生产需求是未来的研究方向。随着激光技术等科技进步,SLC 技术将获得迅猛发展,其应用范围会不断扩大,成型部件质量也将不断提高。

4 LOM 技术工艺特征及其研究进展

LOM 技术^[26-27]的主要特征有:(1)只使用激光对其轮廓进行切割,所以其成型速度快且大部分情况下用于加工内部结构简单的大型零部件;(2)获得高强度金属零件取决于金属薄片强度,不需要支撑结构,可以直接加工零部件;(3)模型精度较高,在成型过程中翘曲变形较小;(4)金属薄片不需要使用高能输入或特殊装置烧结和熔化。

LOM 技术的缺点^[26-28]:(1)成型过程需要激光,所以需要在专门的实验室进行,耗费较高;(2)在 Z 轴方向成型零部件强度和抗压能力有限,因为在该方向上成型零部件是通过热熔胶粘合而成的;(3)成型零部件表面有台阶纹理,很难直接形成形状精细、多曲面的部件,还需后续处理。

南京紫金立德的 LOM 专利技术因具备全球范围的垄断性致使采用该技术的产品非常少,应用的行业比较窄。LOM 工艺支持多种材料,包括金属箔、塑料膜、纸、陶瓷膜等,但现在大多数使用纸作为材料,使用金属材料的情况比较少。Sasahara 等^[28]在使用统一的切片技术和阶梯效应存在情况下研究出了可以用于 LOM 生产部件的金属板。Ahn 等^[29]提出了一种用来量化 LOM 制造部件表面粗糙度的方法,可以用来对其制造的金属零件表面粗糙度进行预测。LOM 成形过程中金属板层之间靠热熔粘结剂粘合在一起,未能形成高性能的冶金结合,与主流的激光立体成形、电子束成形等技术对比,该方法成形件力学性能及工艺可行性还有待学术界和工业界深入探讨。目前国内外金属零件 LOM 的研究中,分层板的结合技术主要有非金属粘结剂粘结结合、金属陶瓷复合材料的粘结烧结结合、机械连接、低熔点合金连接等,所连接的分层板厚度从 0.02~0.5mm 不等,如果所连接的分层板厚度不在其范围内,为保证金属零部件成品精度,需开发新的 LOM 方法。现有金属分层板的连接工艺有靠合金的熔化来实现分层板的连接、螺栓连接加电弧焊^[30]工艺等,但均未获得满意的效果。随着科

技和金属材料的发展,适用于 LOM 技术工艺的金属材料会有所增加,分层板的结合技术和 LOM 技术工艺在金属零部件制造方面将有所突破。

5 电子束熔覆技术工艺特征及其研究进展

电子束熔覆技术的优点有^[31-33]:(1)材料利用率高,多余的材料可回收重复使用;(2)提供的真空环境减少了电子散射,降低了金属氧化程度,而且还提供了一个很好的热平衡系统,从而保证了其成型的稳定性;(3)生产周期短,效率高。

其缺点^[31,34-35]:(1)为了通过一次性扫描完成材料的熔化沉积,电子束扫描速度或工作台移动速度受限,只能进行逐点或分区加热,因此加热的均匀性较差;(2)材料受热不均将对其精度和力学性能产生不良影响,其中热应力严重时会使零件翘曲;(3)由于送粉/丝装置的存在而限制了真空成形室的大小,从而不利于超大成形件的制备。

采用美国国家航空航天局 Langley 研究中心开发的工艺^[36](电子束自由形状制造)能成形各种可焊接的合金构件。日本 Osaka 大学和韩国 Pohang 大学在电子束熔覆技术方面也进行了大量的研究工作。国内,清华大学激光快速成形中心联合国内主要的电子束设备提供单位进行了多方论证,开发出电子束选区同步烧结工艺及三维分层制造设备^[37]。

该技术是近年来刚刚提出的新课题,取得了一定发展,但还需进行几个方面的深入研究:(1)提高材料的输送精度,进而提高对熔池的控制;(2)工艺需更系统化,解决工艺参数等问题,使成形部件更加精确优等;(3)理论研究需进一步深入,使理论与成形工艺更好的相互优化。

该技术具有很多优点及广泛的应用前景,但仍处于发展初期,所以当前研究的重点之一还是对基础问题的研究。

6 结语

最近,美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的研究团队研究了一项困扰着常见金属 3D 打印技术的重大问题,在预测和最小化金属增材制造零部件无效缺陷、表面粗糙度方面有最新见解,有可能加快 3D 打印技术的应用。FilametTM是 The Virtual Foundry 公司推出的一款新型金属 3D 打印线材。FilametTM使得任意一台标准的桌面 3D 打印机都可以打印出纯金属 3D 对象,该成果可能将改变 3D 打印金属的方式。随着科技的快速发展,金属零件 3D

打印技术将会获得更多的技术突破,进而使3D打印技术应用到更多领域。

参考文献

- [1] 黄树槐,张祥林,马黎,等.快速原型制造技术的进展[J].中国机械工程,1997,8(5):8-12.
- [2] 刘光富,李爱平.快速成形与快速制模技术[M].上海:同济大学出版社,2004.
- [3] 李小丽,马剑雄,李萍,等.3D打印技术及应用趋势[J].自动化仪表,2014,35(1):1-5.
- [4] Zhang Y, Hao L, Savalani M M, et al. Characterization and dynamic mechanical analysis of selective laser sintered hydroxyapatite-filled polymeric composites[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2008, 86(3): 607-616.
- [5] Mazzoli A, Moriconi G, Pauri M G. Characterization of an aluminum-filled polyamide powder for applications in selective laser sintering[J]. Material and Design, 2007, 28(3): 993-1000.
- [6] Olakanmi E O. Effect of mixing time on the bed density, and microstructure of selective laser sintered aluminium powders[J]. Materials Research, 2012, 15(2): 167-176.
- [7] Olakanmi E O. Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al-Mg, and Al-Si powder; Effect of processing conditions and powder properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(8): 1387-1405.
- [8] Walker D C, Caley W F, Brochu M. Selective laser sintering of composite copper-tin powders[J]. Journal of Materials Research, 2014, 29(17): 1997-2005.
- [9] Sreenivasan R, Goel A, Bourell D L. Sustainability issues in laser-based additive manufacturing[J]. Physics Procedia, 2010, 5 (Part A): 81-90.
- [10] Lykov P A, Sapozhnikov S B, Shulev I S, et al. Composite micropowders for selective laser sintering[J]. Metallurgist, 2016, 59(9/10): 851-855.
- [11] Amorim F L, Lohrengel A, Neubert V, et al. Selective laser sintering of Mo-CuNi composite to be used as EDM electrode[J]. Rapid Prototyping Journal, 2014, 20(1): 59-68.
- [12] Xie Fangxia, He Xinbo, Cao Shunli, et al. Structural and mechanical characteristics of porous 316L stainless fabricated by indirect selective laser sintering[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(6): 838-843.
- [13] Xu F, Wong Y S, Loh H T. Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2000, 19(5): 283-296.
- [14] Paul R, Anand S. Process energy analysis and optimization in selective laser sintering[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2012, 31(4): 429-437.
- [15] Wang Jin, Yang Mo, Zhang Yuwen. A nonequilibrium thermal model for direct metal laser sintering[J]. Numerical Heat Transfer Part A-Applications, 2015, 67(3): 249-267.
- [16] Thijs L, Verhaeghe F, Craeghs T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2010, 58(9): 3303-3312.
- [17] Yadroitsev I, Bertrand P, Smurov I. Parametric analysis of the selective laser melting process[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(19): 8064-8069.
- [18] Miranda G, Faria S, Bartolomeu F, et al. Predictive models for physical and mechanical properties of 316L stainless steel produced by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 657: 43-56.
- [19] Masoudi A, Boliot R, Coddet C. Investigation of the laser-powder-atmosphere interaction zone during the selective laser melting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 122-132.
- [20] Song Bo, Dong Shujuan, Deng Sihao, et al. Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting[J]. Optics and Laser Technology, 2014, 56: 451-460.
- [21] Jia Qingbo, Gu Dongdong. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts; Densification, microstructure and properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 585: 713-721.
- [22] Durejko T, Zietala M, Polkowski W, et al. Thin wall tubes with Fe3Al/SS316L graded structure obtained by using laser engineered net shaping technology[J]. Materials & Design, 2014, 63(2): 766-774.
- [23] Jeng J Y, Lin M C. Mold fabrication and modification using hybrid processes of selective laser cladding and milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110(1): 98-103.
- [24] 于承雪,景财年,李怀学.激光熔覆裂纹的形成机理及控制方法[J].航空制造技术,2012,(4):75-79.
- [25] Liu Dejian, Lippold J C, Li Jia, et al. Laser engineered net shape (LENS) technology for the repair of Ni-base superalloy turbine components[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45A(10): 4454-4469.
- [26] 于冬梅. LOM(分层实体制造)快速成型设备研究与设计[D]. 石家庄:河北科技大学,2011.
- [27] Ghariblu H, Rahmati S. New process and machine for layered manufacturing of metal parts[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2014, 136(4): 152-161.
- [28] Sasahara H, Tsutsumi M, Chino M. Development of a layered manufacturing system using sheet metal-polymer lamination for mechanical parts[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 27(3): 268-273.
- [29] Ahn D, Kweon J H, Choi J, et al. Quantification of surface roughness of parts processed by laminated object manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(2): 339-346.
- [30] 赵万生,郭艳玲,詹涵菁,等.数控快走丝线切割机床加工精度分析及软件补偿方法[J].制造技术与机床,2000,(12):12-14.