

激光与光电子学进展

送粉式激光增材和铣削减材复合制造 316L 不锈钢的表面质量及力学性能

陈峰, 宋长辉*, 杨永强, 魏宏鸣, 周恒

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641

摘要 为了研究送粉式激光增材和铣削减材复合制造零件的表面质量及力学性能,以 316L 不锈钢粉末为原料,通过“增材-减材-增材-减材”交替循环的方式进行样件的制造,并对其表面粗糙度、显微硬度和力学性能进行分析测试。结果表明:送粉式激光增材和铣削减材复合制造样件的表面粗糙度随着铣削速度的增大而下降,随着每齿进给量的增加而增大;送粉式激光增材和铣削减材复合制造样件的表面粗糙度较传统工艺生产的基板试样更低,显微硬度较增材制造样件和锻造件更高,抗拉强度和屈服强度比增材制造样件分别提高了 5% 和 60.5%,但断后伸长率却有所降低。送粉式激光增材和铣削减材复合制造技术能够制造出具有高表面质量和优良力学性能的零件,可直接应用于 316L 不锈钢轮胎模具等零件的制造。该技术充分融合了增材制造的高材料利用率、高自由度以及减材制造的高精度、高表面质量优势,可以获得结构复杂、形状精度和表面质量高的零件。

关键词 激光技术; 激光定向能量沉积; 铣削加工; 复合制造; 316L 不锈钢; 表面质量; 力学性能

中图分类号 TF124; TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0114009

Surface Quality and Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Manufactured by Powder Feeding Laser Additive and Milling Subtractive Hybrid Manufacturing

Chen Feng, Song Changhui*, Yang Yongqiang, Wei Hongming, Zhou Heng

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

Abstract To investigate the surface quality and mechanical properties of parts produced by powder feeding laser additive and milling subtractive hybrid manufacturing technology, using 316L stainless steel as the research object, we manufactured the samples by the alternate “additive-subtractive-additive-subtractive” cycle and tested the surface roughness, microhardness, and mechanical properties of the samples. The findings demonstrate that the surface roughness of the samples produced by the powder feeding laser additive and milling subtractive hybrid manufacturing decreases with increasing milling speed and increases with increasing feed per tooth. The powder feeding laser additive and milling subtractive hybrid-manufactured samples have lower surface roughness than the substrate sample prepared by the traditional process and have higher microhardness than additive-manufactured and forged parts. The tensile and yield strengths of powder feeding laser additive and milling subtractive hybrid-manufactured samples increase by 5% and 60.5%, respectively, compared with the additive-manufactured sample. However, their

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-23; 录用日期: 2021-04-28

基金项目: 广东省重点研发计划(2018B090905001)、国家自然科学基金(U2001218, 51875215, 81772428)、广东省特支计划(2019TQ05Z110)、广东省区域联合基金重点项目(2020B1515120013)

通信作者: *song_changhui@163.com

elongation rate after breaking reduces. The powder feeding laser additive and milling subtractive hybrid manufacturing technology can produce parts with high surface quality and good mechanical properties and can be directly applied to manufacture parts, such as 316L stainless steel tire molds. This method combines the features of additive manufacturing's high material utilization and degree of freedom with subtractive manufacturing's high precision and surface quality to produce parts with complex structures as well as high shape accuracy and surface quality.

Key words laser technique; laser-directed energy deposition; milling processing; composite manufacturing; 316L stainless steel; surface quality; mechanical properties

1 引言

目前,越来越多结构复杂、性能优异的零件被应用于航空航天、汽车、船舶、生物医疗等高尖端科技产业中,这对零件的加工精度、性能和加工效率等提出了更高要求,传统的加工制造工艺难以满足这些要求。在这种形势下,增材制造技术应运而生。该技术逐层累加的成形方式赋予增材制造高效灵活的特点,可实现复杂零件的直接成形^[1-3],得到了国内外的关注与研究,并被广泛应用于汽车、重工机械、模具制造、航空航天、教育、生物医疗、电子产品等领域^[4-5]。

激光增材制造技术根据送粉方式的不同,可以分成以铺粉方式为特点的选区激光熔化技术(SLM)^[6-7]和以送粉方式为特点的激光定向能量沉积技术(LDED)^[8-9]。选区激光熔化技术能够成形出高精度、高性能的零件,但其存在成形效率低和成形尺寸小的问题,而激光定向能量沉积技术则不存在上述问题,所以本文主要研究激光定向能量沉积技术。该技术以高能量密度激光束作为热源,将送入的金属粉末材料或金属丝材进行熔化,熔化的金属按照规定的运动轨迹沉积在基板上,逐层堆积形成所需的零部件^[10]。相比传统的制造技术,激光定向能量沉积技术具有材料利用率高、成形周期短、无需模具和自由度高等优点,能够成形出传统机械加工难以加工甚至无法加工的复杂结构件,从而成为相关领域研究和关注的热点^[11]。

然而,采用激光定向能量沉积技术成形的零件在形状精度、尺寸精度和表面粗糙度等方面与传统机加工零件还存在一定差距,难以达到使用要求。所以,激光定向能量沉积制备的零件一般都需要进行铣削加工等后处理^[12]。鉴于此,一些学者将铣削减材技术引入到激光定向能量沉积技术中,提出了一种基于激光增材和铣削减材的增减材复合制造技术(A/SHM)。该技术结合了两种技术的优势,能够制造出任意复杂结构的零件,同时还可以保证

零件的精度和质量。因此,增减材复合制造技术具有巨大的发展潜力和广阔的应用前景,已成为各国学者的研究热点。例如:Jeng等^[13]在磨床上搭建了激光熔覆装置,并完成了金属、合金注塑模具的制造;Song等^[14]采用金属电弧焊与铣削加工相结合的技术获得了高精度和高表面质量的增材制造零件;Xiong等^[15]提出了将等离子沉积与铣削加工技术相结合的技术,并采用该技术获得了比传统真空精密熔模铸造组织更精细、均匀以及力学性能更优异的航空发动机零件。

目前,增减材复合制造技术仍处于探索阶段,国内更是处于初步研究阶段。因此,有必要对其进行研究,从而为国内增减材复合制造的研究提供参考。本课题组采用送粉式激光增材和铣削减材复合技术制造了316L不锈钢样件,并对其表面质量、显微硬度和力学性能进行了测试和评价。本研究对激光送粉增材和铣削减材复合制造工艺研究提供了参考。

2 实验

2.1 实验设备与实验材料

本实验采用的设备是广州雷佳增材科技有限公司自主研发的增减材设备LASERADD DED-500,如图1所示,在三轴数控机床上集成了半导体激光器、载气式可调送粉器、自主研发的同轴送粉



图1 实验设备

Fig. 1 Experimental equipment

沉积装置及其他辅助装置。该设备以 1.5 kW 半导体激光器为热源实现增材制造,以三轴数控机床所带刀具实现减材制造。

本实验选用的基体材料为 316L 不锈钢,其尺寸为 200 mm×100 mm×10 mm。沉积粉末材料选用 316L 不锈钢粉末,其粒径范围为 53~150 μm,其化学成分如表 1 所示。

2.2 实验方法

送粉式激光增材和铣削减材复合制造(以下简称“增减材复合制造”)的加工方式是激光送粉增材制造和铣削减材加工交替进行,具体过程如图 2 所示。先进行激光送粉增材制造,待沉积高度为 2 mm 时,立即将沉积头自动换成铣刀对沉积层进行铣削加工,铣削结束后把铣刀换成沉积头进行沉积,沉积 2 mm(高度)后,再进行铣削,如此往复,直

表 1 316L 不锈钢粉末的化学成分
Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel powder

Element	Mass fraction /%
Cr	17.3
Ni	12.23
Mo	2.17
Si	1.04
Mn	0.084
O	0.079
P	0.014
C	0.013
Fe	Bal.

到整个样件加工完成。为了与基板试样铣削后的表面粗糙度进行对比,成形件冷却到室温后才进行最后一道铣削加工。

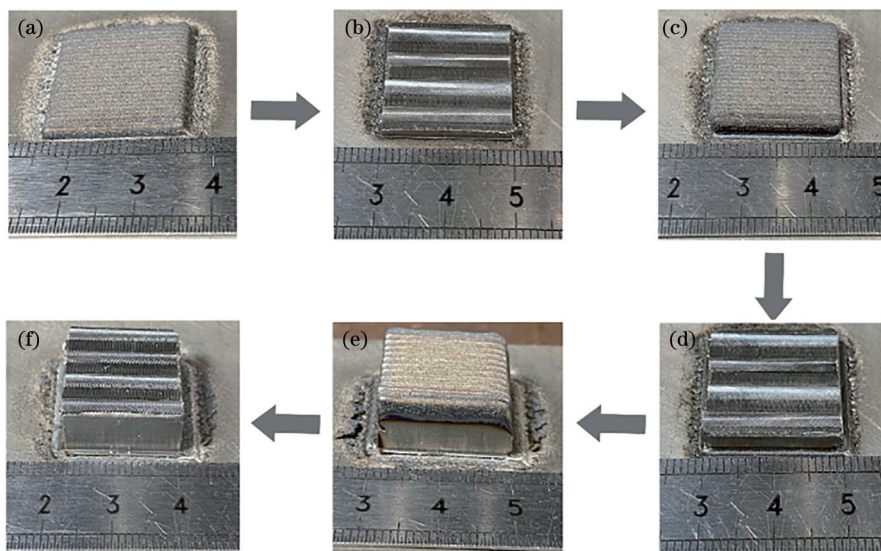


图 2 增减材复合制造 316L 不锈钢样品示意图。(a)增材制造;(b)减材制造;(c)增材制造;(d)减材制造;(e)增材制造;(f)完成制造

Fig. 2 Schematics of 316L stainless steel sample prepared by additive and subtractive hybrid manufacturing. (a) Additive manufacturing; (b) subtractive manufacturing; (c) additive manufacturing; (d) subtractive manufacturing; (e) finish manufacturing

在增减材复合制造过程中,为了探索减材工艺参数对增材成形件表面质量的影响规律,根据前期研究结果,选择成形较好的参数进行增材成形,选取对表面粗糙度影响较大的铣削速度和每齿进给量进行铣削实验。铣削工艺参数如表 2 所示。

在实验开始前,对基材进行喷砂打磨处理,之后用酒精清洗干净,然后在 LASERADD DED-500 增减材设备上增加和减材交替加工,共加工 10 个尺寸为 20 mm×20 mm×10 mm 的方块。实验过程中采用高纯氩气作为保护气。实验结束后,对

表 2 增减材复合制造 316L 不锈钢试样的铣削参数
Table 2 Milling parameters of 316L stainless steel sample prepared by additive and subtractive hybrid manufacturing

Milling parameter	Parameter value
Cutting speed / (mm·min ⁻¹)	60, 80, 100, 120, 140
Feed per tooth / (mm·z ⁻¹)	0.02, 0.05, 0.08, 0.11, 0.14
Depth of cut / mm	1

样品进行线切割,然后用酒精清洗样品,之后进行干燥处理。采用 BMT EXPERT 型 3D 表面形貌分析仪测量样品加工表面的粗糙度,采用 HMV-2T 型

显微硬度计测量加工表面的显微硬度。此外,为了探究 316L 不锈钢增减材复合制造试样与传统工艺制造试样铣削性能的异同,采用与增减材复合制造试样相同的铣削加工参数对基板试样进行铣削实验,并测量铣削加工后的表面粗糙度。

另外,选择优化的增材工艺和减材工艺制备拉伸测试用方块样品,其制造方式与图 2 所示的制造方式相同。然后采用铣削和线切割的方式将方块样品加工成拉伸试样,采用 CMT5105 万能试验机测试试样的拉伸性能,包括抗拉强度(UTS)、屈服强度($\sigma_{0.2}$)和断后伸长率(E)。

3 结果和讨论

3.1 增减材复合制造样品的表面质量分析

采用激光定向能量沉积成形的样品,其表面仍

会存在明显的熔道痕迹,熔道与熔道之间存在凹谷带,且表面还黏附着大量未熔粉末颗粒,如图 3(a)所示。可见,激光定向能量沉积样品的表面质量较差,这将严重影响样品的可靠性和耐久度,所以对激光定向能量沉积和铣削减材复合制造的研究十分有必要。图 3 为增减材复合制造 316L 不锈钢增材和减材后的表面形貌。从图 3(a)可以看出,铣削前,激光定向能量沉积样品的表面较为粗糙,肉眼可以看到熔道痕迹,且其表面还黏附着大量未熔粉末。从图 3(b)可以看出,经过铣削加工的样品,其表面变得光亮、平整,粗糙度大大降低,铣削表面呈现网纹状纹理。这种现象出现的原因是,受切削参数的影响,样品的已加工表面会出现塑性凸出和变形回弹,使得切削刃对已加工表面再一次切削,从而在加工表面形成网纹刀痕^[16]。

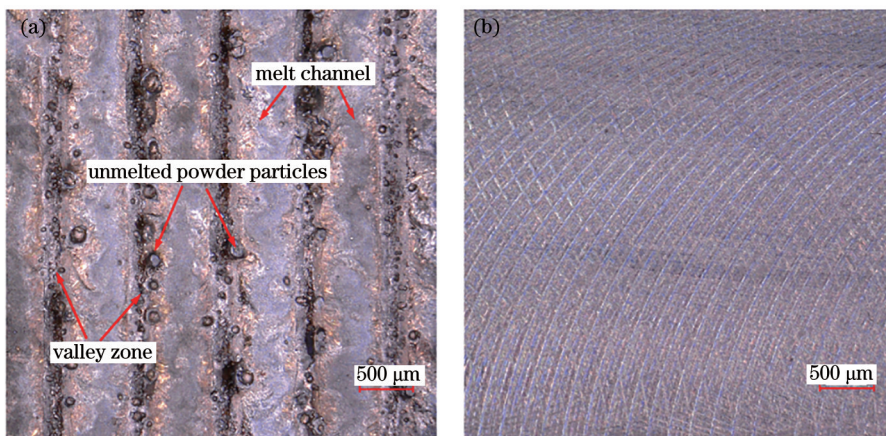


图 3 增减材复合制造 316L 不锈钢增材和减材表面形貌。(a)增材表面形貌;(b)减材表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of 316L stainless steel added and subtracted by additive and subtractive hybrid manufacturing.

(a) Surface after additive manufacturing; (b) surface after subtractive manufacturing

对于结构规则的加工件,只需按照一定规律(如增材高度、加工时间等)进行交替加工,这时加工件最终的加工精度和表面质量仅由铣削加工过程决定。图 4 给出了增减材复合制造 316L 不锈钢表面粗糙度随铣削参数变化的曲线。图 4(a)为表面粗糙度随铣削速度的变化。可以看出:随着铣削速度提高,表面粗糙度呈下降趋势;当铣削速度在 60~100 mm/min 范围内时,表面粗糙度迅速下降,当铣削速度大于 100 mm/min 后,表面粗糙度下降较慢。这是因为随着铣削速度的增加,切削力增大,刀具与样品摩擦产生的热量随之增加,温度升高,样品表面的热软化作用增强,加工表面的塑性增大,硬度降低,使得样品易于加工,所以表面粗糙度降低。

图 4(b)为表面粗糙度随每齿进给量的变化。随着每齿进给量增加,表面粗糙度增大。当每齿进给量在 0.02~0.05 mm/z 之间时,表面粗糙度增加得较小。这是因为此时每齿进给量较小,切削厚度较小,刀具的磨损较小,甚至无磨损,所以表面粗糙度较小。当每齿进给量超过 0.05 mm/z 后,表面粗糙度迅速增加,最高可达到 2.58 μm (R_s)。这是因为随着每齿进给量增加,切削厚度急剧增加,刀具磨损严重,导致已加工表面残留的材料高度增加,从而使得表面粗糙度增加。此外,从图 4 中还可以看出,样品顶面的粗糙度总是高于侧面。产生这种现象主要有两方面原因:1)侧面的铣削是不连续加工,切削刃与材料相互作用的行程远小于端面铣削加工,刀具磨损较小,粗糙度较小;2)样品显微组织

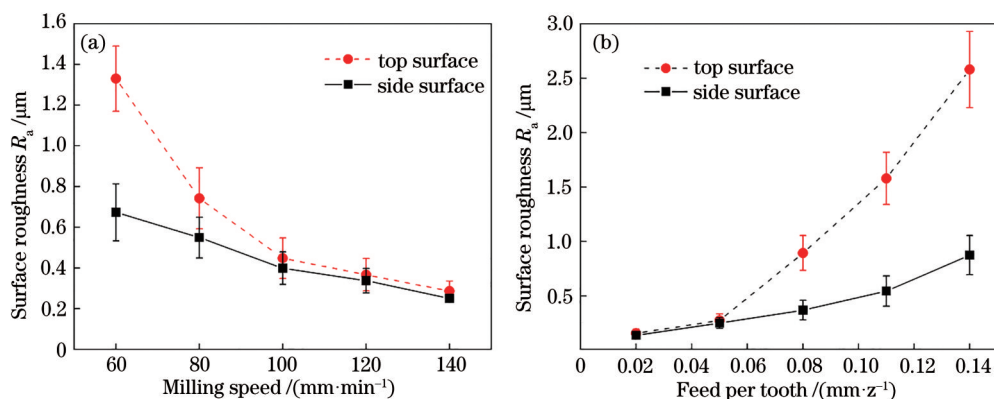


图 4 增减材复合制造 316L 不锈钢表面粗糙度随铣削参数的变化。(a)表面粗糙度随铣削速度的变化;(b)表面粗糙度随每齿进给量的变化

Fig. 4 Variations of surface roughness of 316L stainless steel prepared by additive and subtractive hybrid manufacturing with milling parameters. (a) Variation of surface roughness with milling speed; (b) variation of surface roughness with feed per tooth

和力学性能的各向异性。这也说明激光定向能量沉积 316L 不锈钢的减材加工也具有各向异性的特点。选择铣削速度为 140 mm/min 和每齿进给量为 0.05 mm/z 时,加工件的表面粗糙度较小,同时加工效率较高,可以作为增减材复合制造 316L 不锈钢时减材加工的铣削参数。

图 5 是增减材复合制造试样和传统工艺制造基板试样铣削后顶面的粗糙度对比。从图 5 中可以看出,对于增减材复合制造试样和基板试样而言,随着每齿进给量增加,表面粗糙度都呈增大的趋势,且基板试样表面粗糙度增大的速度比增减材复合制造试样的快,同时,基板试样的表面粗糙度均高于增减材复合制造试样的表面粗糙度。造成两者表面粗糙度差异的根本原因是内部微观组织差异。相比于传统工艺制备的基板试样,增减材复合制造

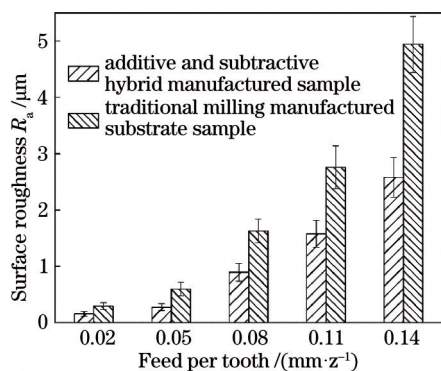


图 5 增减材复合制造试样和传统工艺制造基板试样铣削后的表面粗糙度对比

Fig. 5 Surface roughness comparison between additive and subtractive hybrid manufactured sample and traditional process manufactured substrate sample after milling

试样的组织更均匀,晶粒尺寸更细小,因此其硬度和强度均更高,而塑性更差。在进行铣削加工时,增减材复合制造试样的塑性变形程度较小,主要发生脆性断裂,且变形回弹较小,不易产生积屑瘤,因此表面粗糙度减小。

3.2 增减材复合制造样件的性能分析

3.2.1 显微硬度

图 6 为增减材复合制造、增材制造和锻造三种成形方法制备的 316L 不锈钢样件的显微硬度对比,其中增材成形参数与增减材复合制造中的增材参数相同,锻造件的显微硬度来自文献[17]。从图 6 中可以看出,增减材复合制造样件的显微硬度比增材制造样品、锻造件分别高 11.2% 和 33.7%。这是因为增材制造快速熔化和快速冷却的成形方式使

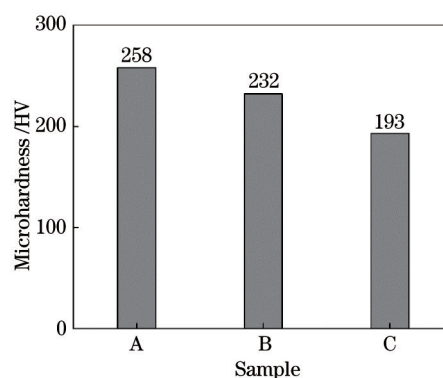


图 6 不同成形方法制备的 316L 不锈钢样件的显微硬度 (A:增减材复合制造样品;B:增材制造样品;C:锻造件)

Fig.6 Microhardness of 316L stainless steel samples prepared by different forming methods (A: additive and subtractive hybrid manufactured sample; B: additive manufactured sample; C: forged sample)

得样件内部为大量细小的等轴晶,因此增材制造样件的硬度高于锻造件。同时,铣削加工会对加工表面产生加工硬化作用,也会使加工表面的硬度升高,所以增减材复合制造样件的表面显微硬度比增材制造样件高。

3.2.2 力学性能

图 7 为增减材复合制造试样和增材制造试样的

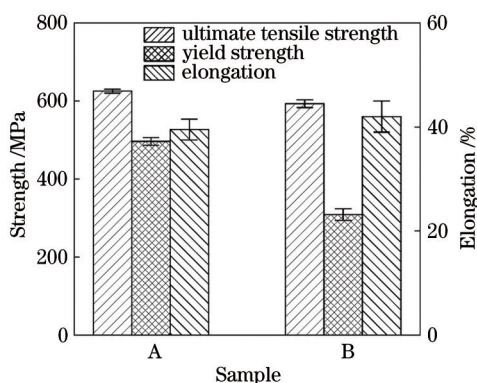


图 7 不同成形方法制备的 316L 不锈钢试样的拉伸性能 (A: 增减材复合制造试样; B: 增材制造试样)

Fig. 7 Tensile properties of 316L stainless steel samples prepared by different forming methods (A: additive and subtractive hybrid manufactured sample; B: additive manufactured sample)

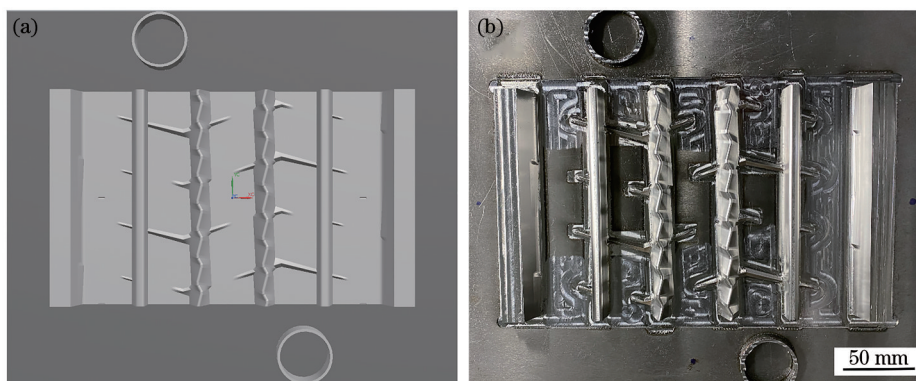


图 8 增减材复合制造的 316L 不锈钢轮胎模具零件。(a) 轮胎模具的三维模型; (b) 增减材复合制造的轮胎模具零件

Fig. 8 316L stainless steel tire mold parts manufactured by additive and subtractive hybrid manufacturing. (a) Three-dimensional model of tire mold; (b) tire mold parts manufactured by additive and subtractive hybrid manufacturing

5 结 论

本文通过对增减材复合制造 316L 不锈钢试样的表面质量、显微硬度和力学性能进行研究,得到了如下结论:

1) 试样的表面粗糙度随着铣削速度的增大而降低,随着每齿进给量的增加而增大。通过对比增减材复合制造试样和基板试样的铣削性能可以发

现,基板试样铣削后的表面粗糙度高于增减材复合制造试样铣削加工后的表面粗糙度,且随着每齿进给量增加,基板试样表面粗糙度的上升趋势大于增减材复合制造试样,说明增减材复合制造技术能够提高试样的表面质量,且能够达到比传统加工工艺更好的效果。

2) 增减材复合制造试样的表面显微硬度比增材制造试样和锻造件分别高 11.2% 和 33.7%。

4 增减材复合制造 316L 不锈钢零件

采用优化的减材工艺参数进行增减材复合制造,制备出了 316L 不锈钢轮胎模具零件,零件模型和实物如图 8 所示。从图 8 中可以看出,增减材复合制造轮胎模具零件的表面质量良好。对其各表面的粗糙度进行测量,测得的表面粗糙度(R_a)平均值为 $(0.23 \pm 0.1) \mu\text{m}$ 。

综合分析表明,激光定向能量沉积技术和铣削减材技术相结合的增减材复合制造技术可以成形出具有良好表面质量和力学性能的零件。

3) 增减材复合制造试样的抗拉强度和屈服强度比增材制造试样分别提高了 5% 和 60.5%, 而断后延伸率却有所降低, 说明增减材复合制造技术在提高试样性能方面要优于单一的增材制造。

4) 采用优化的减材工艺参数进行增减材复合制造, 制备出了表面质量良好的 316L 不锈钢轮胎模具零件, 其各表面的粗糙度 (R_a) 均值为 $(0.23 \pm 0.1) \mu\text{m}$ 。

综合分析表明, 增减材复合制造技术能够制造具有高表面质量和力学性能的零件。

参 考 文 献

- [1] Conner B P, Manogharan G P, Martof A N, et al. Making sense of 3-D printing: creating a map of additive manufacturing products and services[J]. Additive Manufacturing, 2014, 1/2/3/4: 64-76.
- [2] Singh S, Ramakrishna S, Singh R. Material issues in additive manufacturing: a review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 25: 185-200.
- [3] Huang S H, Liu P, Mokasdar A, et al. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5/6/7/8): 1191-1203.
- [4] Wholers T. Wholers report 2015: 3D printing and additive manufacturing state of industry annual worldwide progress report[R]. Colorado: Wholers Associates, 2015.
- [5] Lu B H, Li D C. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1-4.
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.
- [6] Wang D, Ou Y H, Dou W H, et al. Research progress on spatter behavior in laser powder bed fusion[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0900001.
王迪, 欧远辉, 窦文豪, 等. 粉末床激光熔融过程中飞溅行为的研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0900001.
- [7] 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.
- [8] Wang Y, Huang Y L, Yang Y Q. Numerical simulation on coaxial powder feeding laser directional energy deposition of IN718[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602115.
王予, 黄延禄, 杨永强. 同轴送粉激光定向能量沉积 IN718 的数值模拟[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602115.
- [9] Yao W, Huang Y L, Yang Y Q. Size prediction of directed energy deposited cladding tracks based on support vector regression[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0802007.
姚望, 黄延禄, 杨永强. 基于支持向量回归的定向能量沉积熔道尺寸预测[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0802007.
- [10] Lin X, Huang W D. Laser additive manufacturing of high-performance metal components[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2015, 45(9): 1111-1126.
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.
- [11] Chen X H, Li J, Cheng X, et al. Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 703: 567-577.
- [12] Li S, Zhang B, Bai Q. Effect of temperature buildup on milling forces in additive/subtractive hybrid manufacturing of Ti-6Al-4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(9/10): 4191-4200.
- [13] 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.
- [14] Song Y A, Park S, Choi D, et al. 3D welding and milling: a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(9): 1057-1062.
- [15] Xiong X H, Zhang H O, Wang G L, et al. Hybrid plasma deposition and milling for an aeroengine double helix integral impeller made of superalloy[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(4): 291-295.
- [16] Huang X, Bai Q, Li Y T, et al. Machining finish of titanium alloy prepared by additive manufacturing[J]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 872: 43-48.
- [17] Naves V T G, da Silva M B, da Silva F J. Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel[J]. Wear, 2013, 302(1/2): 1201-1208.