

激光与光电子学进展

工艺参数对增减材复合制造 GH3536 高温合金
表面质量的影响张英伟^{1*}, 王静¹, 孙权威², 白倩², 凌和锋¹, 李晓丹¹¹航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司工艺研究所, 辽宁 沈阳 110850;²大连理工大学高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116024

摘要 GH3536 高温合金具有优异的耐腐蚀性和高温强度, 常用于燃烧室和燃气轮机高温零部件的制造。增减材复合制造(ASHM)技术综合了增材成形灵活性和减材表面质量好的优势, 是制造高性能 GH3536 零件的有效途径。由于 ASHM 采用增材和减材交替进行的方式, 因此确定最优的增材工艺参数, 选择合适的刀具类型对提高 GH3536 零件的制造质量具有重要意义。利用激光选区熔化制备了增材试样, 检测了试样的相对致密度以获得 GH3536 的最优增材成形参数。利用扫描电子显微镜和电子背散射衍射对最优增材成形参数下加工的 GH3536 的微观结构进行了观察。开展了 GH3536 的 ASHM 实验, 研究了球头刀、圆鼻刀、平面铣刀三种不同类型刀具对试样减材加工表面质量的影响。结果表明: 当激光功率为 400 W、扫描速度为 1750 mm/s 时, 增材试样无明显缺陷, 相对致密度达到 99.93%, 是增材成形的最优参数; 采用圆鼻刀加工的 GH3536 表面粗糙度可达 0.211 μm 。本研究可为 GH3536 零件的 ASHM 参数和刀具类型确定提供指导和参考。

关键词 GH3536 高温合金; 增减材复合制造; 激光选区熔化; 刀具类型; 表面形貌

中图分类号 TH16 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230913

Process Parameters of Additive and Subtractive Hybrid Manufacturing for
GH3536 SuperalloyZhang Yingwei^{1*}, Wang Jing¹, Sun Quanwei², Bai Qian², Ling Hefeng¹, Li Xiaodan¹¹AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, Liaoning, China;²State Key Laboratory of High-Performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China

Abstract GH3536 superalloy has excellent corrosion resistance and elevated-temperature strength, and is commonly used in the manufacturing of elevated-temperature components such as combustion chambers and gas turbines. Additive and subtractive hybrid manufacturing (ASHM) technology combines the advantages of high flexibility in additive manufacturing and good surface quality in subtractive manufacturing, which is an effective way to manufacture high performance GH3536 parts. Since ASHM engages the alternating of additive manufacturing and subtractive manufacturing, it is important to determine the optimal process parameters and suitable type of tools to improve the surface quality of GH3536 parts. The samples are prepared by selective laser melting with different process parameters. The relative density of the samples are measured by precision balance to obtain the optimal parameters for GH3536. Scanning electron microscopy and electron backscattering diffraction are used to observe the microstructure of GH3536 samples with optimal parameters. The samples of ASHM are machined with three different types of tools, i. e. ball end milling, round nose milling and flat end milling. The surface morphology is studied after the machining. The results show that with the laser power of 400 W and the scanning speed of 1750 mm/s, there are no obvious defects in the samples and the relative density reaches 99.93% which are the optimal process parameters in additive manufacturing. The surface roughness of the GH3536 samples processed by the round nose milling achieves 0.211 μm . This study provides guidance to the determination of process parameters and tools' type of ASHM for GH3536 parts.

收稿日期: 2023-03-22; 修回日期: 2023-04-27; 录用日期: 2023-05-18; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(52175381)、国家重点研发计划(2017YFB1104000)、航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2022-B-IV-012-001)

通信作者: *saczyw@163.com

Key words GH3536 superalloy; additive and subtractive hybrid manufacturing; selective laser melting; tool type; surface morphology

1 引言

激光选区熔化(SLM)是目前主流的增材制造方式之一。由于 SLM 具有高能量密度和小熔池,因此能够制造具有更高精度,更加复杂的零件^[1],在航空航天、汽车等工业生产领域具有广阔的应用前景^[2]。但是由于 SLM 相邻层之间不可避免地存在台阶效应^[3],SLM 制备的零件表面质量及形位精度较低,阻碍了该技术的进一步应用^[4]。增减材复合制造(ASHM)将数控加工技术与 SLM 增材制造技术结合,增材和减材交替进行,既保留了增材制造灵活性的优势,又提高了零件的加工精度和表面质量^[5]。唐成铭等^[6]开发了一种基于 SLM 技术和高速切削技术的复合制造系统,提出了基于此系统的 ASHM 工艺规划方法,并验证了此系统加工复杂曲面零件的可行性;Chen 等^[7]针对复杂结构件提出了一种计算最优化分层高度的方法,并在此基础上提出了一种自上而下的复合制造工序规划方法,以提高复合制造的整体效率;Wüst 等^[8]对马氏体时效钢的复合制造工艺参数进行了研究,通过调整增材工艺参数与减材工艺参数来提升成形质量,并发现铣削中的径向切削深度对成形质量影响最大。以上研究大多是为了提升 ASHM 的效率和减材零件的表面质量而进行的工序规划和工艺参数的优化,然而,增材工艺选择不当会使零件产生气孔、球化、裂纹等缺陷^[9-11];刀具选择不当可能会增加刀具磨损程度,减少刀具寿命,进而影响零件减材后的表面质量。因此研究增材工艺参数和减材刀具类型选择对零件表面质量的影响具有重要的现实意义。

GH3536 合金是一种以 Cr、Mo 为主要强化元素的固溶强化型镍基高温合金,具有优良的耐腐蚀性和抗氧化性,且在高温下拥有良好的蠕变和持久性能,主要用于制造燃烧室和燃气轮机等高温零部件^[12]。本文研究了 GH3536 的 ASHM 工艺参数对试样致密度、微观组织及加工表面质量的影响,确定了 ASHM 的最优参数及刀具类型,可为 GH3536 零件的 ASHM 参数确定提供指导和参考。

2 实验与表征方法

所使用的粉末是气雾化方式制备的 GH3536 高温合金粉末(中国科学院金属研究所,沈阳)。GH3536 粉末的化学成分利用化学分析法进行分析,粉末形貌及粒径分布分别利用场发射扫描电子显微镜(SEM, SUPARR 55, Carl Zeiss, 德国)和激光粒度分析仪

(Malvern Mastersizer 2000, Malvern, 英国)进行观测与测量。增减材成形加工使用一体化 ASHM 机床进行,图 1 为机床的实物图。增材成形过程采用 316L 基板,Ar 气作为保护气氛;减材加工采用定制的硬质合金专用刀具进行。制备尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm 和 10 mm×10 mm×15 mm 两种块状试样,采用电火花线切割分离基板和试样,并使用#300~#1500 的 SiC 砂纸对试样进行研磨,随后使用抛光溶液抛光至镜面效果。基于阿基米德排水法,利用精密天平(ME204E, Mettler Toledo, 瑞士)测量试样的相对致密度。利用质量分数为 10% 的草酸溶液对试样进行电解腐蚀。利用光学显微镜(MX51, Olympus, 日本)和场发射 SEM(SU5000, Hitachi, 日本)观察试样表面微观结构。利用配备电子背散射衍射(EBSD)系统的场发射 SEM(SUPARR 55, ZEISS, 德国)对材料织构进行分析,工作电压为 20 kV,扫描尺寸为 1 mm×1 mm,步长为 0.8 μm。利用白光干涉仪(NV9000, Zygo, 美国)对试样表面形貌进行检测与测量。

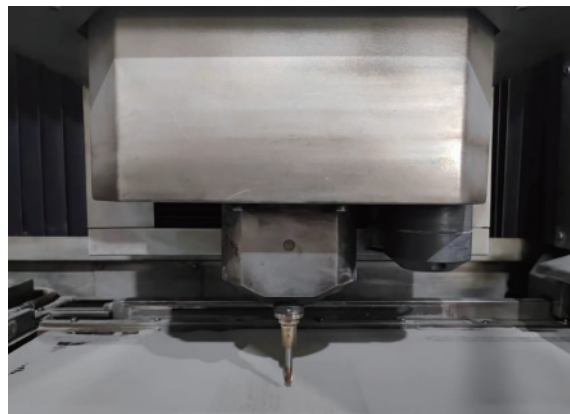


图 1 ASHM 机床
Fig. 1 ASHM machine

3 结果与讨论

3.1 GH3536 粉末原材料分析

GH3536 高温合金粉末的化学成分如表 1 所示,粉末形貌和粒径分布如图 2 所示。由图 2 可知,GH3536 粉末的粒径形态呈球形或近球形,表明其流动性较好,且粉末整体呈浅灰色,色泽均匀,无结块和杂质。粉末粒径大部分在 15~60 μm 范围内,整体呈高斯正态分布,平均粒径为 30.2 μm。粉末原材料符合 SLM 增材成形工艺要求,将粉末在 120 °C 的真空干燥箱中烘干 2 h 后进行增材成形。

表 1 GH3536 高温合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of GH3536 superalloy powder

Element	Cr	Ni	Mo	Co	Mn	Si	C	P,S	Fe	W	Al
Mass fraction /%	22.520	Bal.	9.460	1.600	0.030	0.330	0.070	0.007	19.360	0.740	0.050

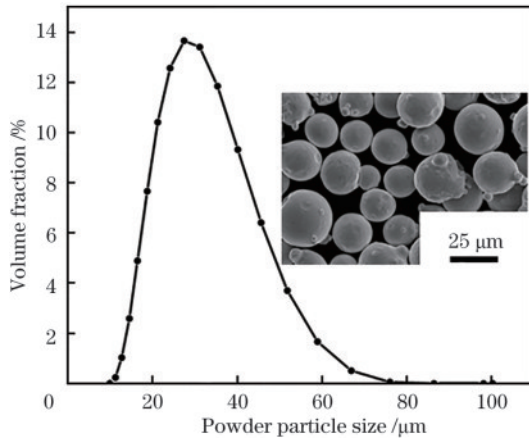


图 2 GH3536 粉末的 SEM 和粒径分布

Fig. 2 SEM and particle size distribution of GH3536 powder

3.2 GH3536 的 SLM 增材成形工艺参数分析

利用波长为 1070 nm 的镱光纤激光器进行 GH3536 的增材成形,最大功率为 500 W,激光光斑半径为 100 μm ,增材成形过程中 316L 基板预热到 80 $^{\circ}\text{C}$ 。为获得 GH3536 增材成形工艺窗口,利用表 2 的成形工艺参数,重点研究不同激光功率和扫描速度对成形致密度的影响。

表 2 GH3536 高温合金的 SLM 成形工艺参数

Table 2 SLM forming process parameters of GH3536 superalloy

Process parameter	Parameter value
Thickness of powder layer $d / \mu\text{m}$	40
Radius of laser spot $r_0 / \mu\text{m}$	100
Scanning distance $h / \mu\text{m}$	80
Laser power P / W	250, 300, 350, 400, 450
Scanning speed $v / (\text{mm/s})$	500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000

由于增材成形试样的相对致密度受激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度等多个工艺参数的影响,而且这些参数之间也相互关联,仅凭单一工艺影响因素无法全面了解工艺参数对致密度的影响规律,因此将这些工艺影响因素归结为 SLM 成形过程激光体能量密度。激光体能量密度^[13]表示为

$$E = \frac{P}{v \times h \times t}, \quad (1)$$

式中: E 为激光体能量密度; P 为激光功率; v 为扫描速度; h 为扫描间距; t 为层厚。

通过不同工艺参数制备的 GH3536 块状试样的金相缺陷检测和密度检测,建立激光体能量密度与相对

致密度的规律关系,如图 3 所示。从图 3 中可以看出,相对致密度随着激光体能量密度的增大而增大,当 E 达到 108 J/mm^3 时,相对致密度开始趋于平稳。但随着 E 的进一步增大,相对致密度又呈下降趋势,这可能是因为激光体能量密度过大导致峰值温度超过材料的沸点,材料气化产生气孔,从而使得致密度降低^[14]。此外,从图 3 插图(a)~(c)中可以看出:在低激光功率、高扫描速度下粉末由于未熔合而产生了大量的孔洞[图 3 插图(a)],此时激光体能量密度大约为 39.06 J/mm^3 ;在高激光功率、高扫描速度的情况下可以观察到严重的球化、飞溅等缺陷的形成[图 3 插图(c)],其激光体能量密度为 93.75 J/mm^3 。当激光体能量密度低时,粉末由于未熔合会产生大量的孔洞;激光体能量密度升高使得峰值温度上升,粉末颗粒充分熔化,提升了熔池的扩散能力,润湿了周围的粉末。然而,过高的激光功率会导致大量的热量积累,熔池不稳定,造成球化、飞溅等缺陷。当激光功率为 400 W、激光扫描速度为 1750 mm/s 、 E 为 71.43 J/mm^3 时,增材成形试样的相对致密度为 99.93%,且该参数下加工的试样未发现明显的孔洞、裂纹等缺陷,成形质量较好[图 3 插图(b)],因此,确定该参数为 GH3536 高温合金 SLM 增材成形的最优工艺参数。

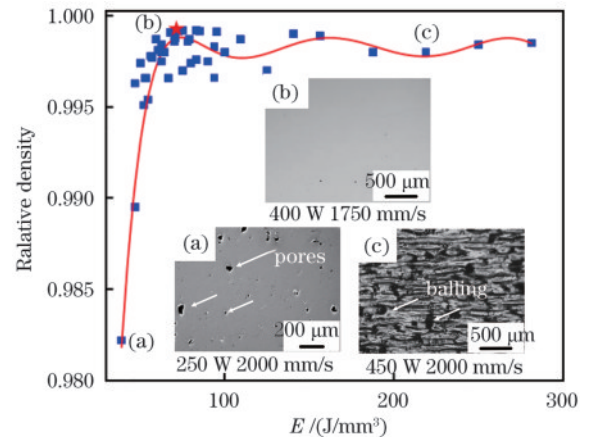


图 3 GH3536 激光体能量密度与相对致密度的规律关系[插图(a)(b)(c)分别展示了气孔缺陷、无缺陷和球化缺陷]

Fig. 3 Regular relationship between laser volume energy density and relative density of GH3536 [insets (a)(b)(c) show the blowhole defects, free of all defects and spheroidization defects]

采用上述最优 SLM 增材成形工艺参数,制备了纯增材试样,并对试样的外表面微观结构进行了分析,如图 4 所示。由图 4(a)、(b)可知,SLM 纯增材试样表面存在微裂纹、熔池速凝产生的不规则轮廓以及黏附的

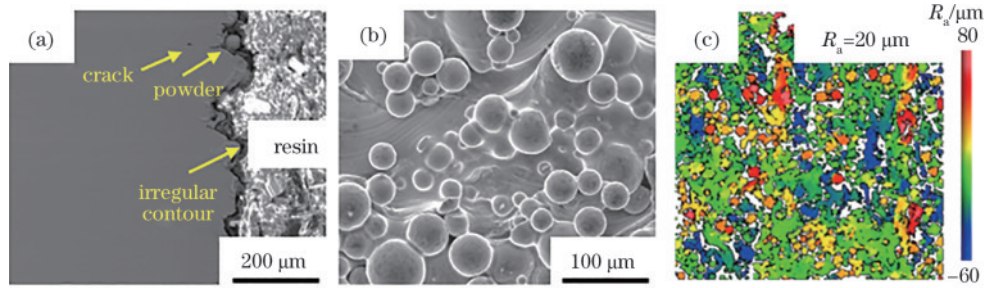


图 4 GH3536 的 SLM 纯增材成形试样表面形貌。(a)(b)原始增材表面 SEM 图像;(c)白光检测的原始增材表面形貌
Fig. 4 Additive surface morphologies of GH3536 sample formed by SLM. (a)(b) SEM images of the original additive surface;
(c) original additive surface morphology by white light interferometer

大量粉末。利用白光干涉仪检测的增材外表面形貌如图 4(c)所示,由图 4(c)可知,未作任何表面处理的原始增材试样的表面粗糙度 R_a 达 $20\ \mu\text{m}$,原始表面质量较差。

对纯增材试样进行表面腐蚀抛光处理,其微观结构如图 5 所示。从试样抛光后的光学显微图像[图 5(a)]可知,该参数下加工的试样未发现明显的裂纹、气孔等缺陷。微观组织[图 5(b)]呈现典型的 SLM

微观结构特征,熔池呈现浅而宽的半球形,熔道宽度为 $150\sim 200\ \mu\text{m}$ 。由 EBSD 图像[图 5(c)]可知,晶界几乎垂直于熔池边界,晶粒沿着热梯度形成,跨越熔池边界呈外延生长。如图 5(d)~(f)所示,GH3536 试样在 $y-z$ 平面内以柱状晶的形式存在^[15]。在柱状晶内,可以观察到胞状和树枝状的亚晶粒,胞状亚晶粒尺寸普遍小于 $1\ \mu\text{m}$ 。不同的亚晶粒反映了不同的熔池凝固形态,胞状和树枝状的亚晶粒分别表示垂直和平行于熔池侧面的凝固形态。

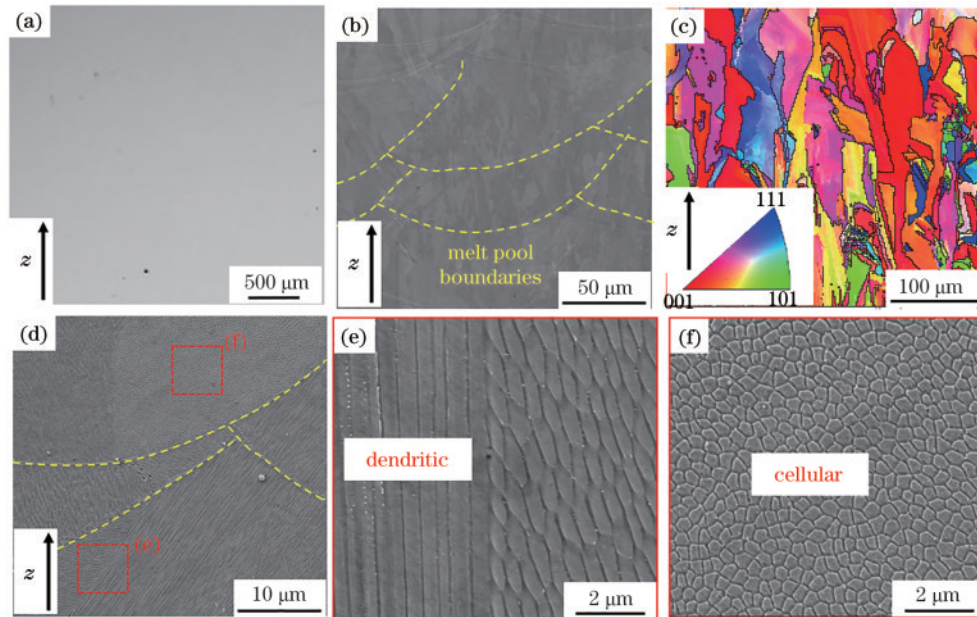


图 5 SLM GH3536 增材试样微观结构。(a)抛光后的光学显微图像;(b)~(f)腐蚀后的微观组织 SEM 图像和 EBSD 图像
Fig. 5 Microstructure of additive GH3536 sample formed by SLM. (a) Optical microscopic image after polishing; (b)~(f) SEM and EBSD images of the microstructure after corrosion

3.3 刀具类型对 GH3536 减材表面质量的影响分析

由于基于 SLM 的 ASHM 中基板及成形方向的限制,减材加工时采用三轴铣削的方式可以保证增材试样更优的表面精度。此外,减材加工工艺参数如刀具类型、主轴转速、刀具进给量等均会对试样的尺寸精度及表面质量产生重要的影响^[16]。ASHM 过程中,减材制造只需将试样的不规则轮廓去除,因此切削用量很小,平均铣削力随着每齿进给量的增加而增加,基本呈线性关系^[17]。铣削加工中,当每齿进给量小于刀尖圆

弧半径时,进给速度和切削深度对已加工表面的表面粗糙度影响较小^[18]。因此,选取主轴转速为 $25000\ \text{r/min}$ 、切削深度为 $0.1\ \text{mm}$ 、进给速度为 $1800\ \text{mm/min}$ 、减材间距 z 为 $0.1\ \text{mm}$ 。重点研究在主轴转速和刀具进给等参数一定的情况下,球头刀、圆鼻刀和平头铣刀三种刀具类型对试样表面质量的影响。

图 6 为 GH3536 ASHM 的试样制备模型及刀具选型方案,在图 6(a)中,AM 试样为纯增材试样,用于对比复合制造前后试样的微观结构和表面形貌变化差

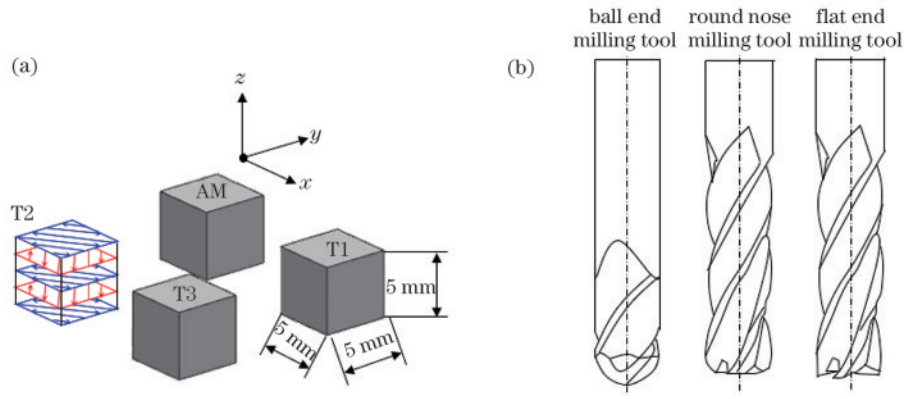


图 6 GH3536 ASHM 的试样制备模型及刀具选型方案。(a) 试样模型; (b) 减材刀具类型

Fig. 6 Sample preparation model and tool selection scheme for GH3536 by ASHM. (a) Sample model; (b) cutting tool types

异。采用上述优化的 SLM 增材成形工艺参数, 分别利用球头刀、圆鼻刀、平头铣刀三种类型刀具对试样 T1、T2、T3 进行减材加工制造, 减材工艺参数如表 3 所示。图 6(b) 为球头刀、圆鼻刀和平头铣刀的刀具形状。为提高制造效率, ASHM 加工策略为每增材 50 次减材

1 次。同时, 为保证表面质量, 减材工序间设定 0.2 mm 的重叠减材区。

本研究中不同刀具均以等高线形式的路径进行三轴铣削。图 7(a)~(c) 分别为球头刀、圆鼻刀和平头铣刀的铣削过程示意图。通过白光干涉仪检测球头刀和

表 3 GH3536 减材工艺参数

Table 3 Milling process parameters of GH3536

Sample	Tool type	Spindle speed $n / (\text{r}/\text{min})$	Feed rate $f / (\text{mm}/\text{min})$	Cutting depth a_p / mm	Separation distance z / mm
T1	Ball end milling	25000	1800	0.1	0.1
T2	Round nose milling	25000	1800	0.1	0.1
T3	Flat end milling	25000	1800	0.1	0.1

Note: T1 is ball end milling sample, T2 is round nose milling sample, T3 is flat end milling sample.

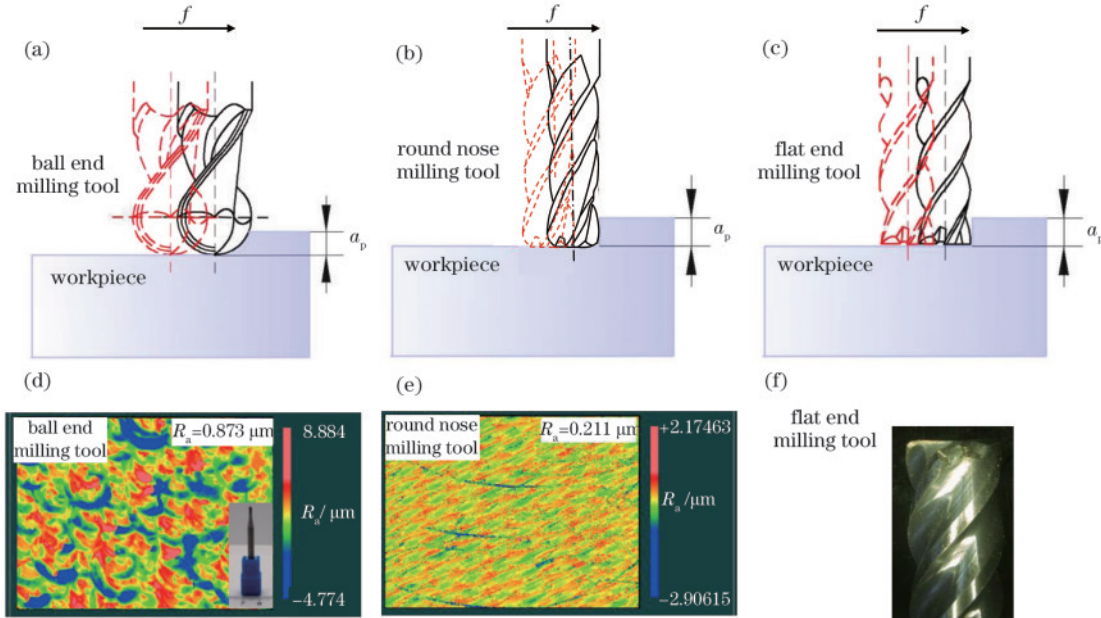


图 7 不同刀具铣削示意图及加工出的试样的表面粗糙度。(a) 圆鼻刀铣削示意图; (b) 球头刀铣削示意图; (c) 平头铣刀铣削示意图; (d) 球头刀加工试样的表面粗糙度; (e) 圆鼻刀加工试样的表面粗糙度; (f) 平头铣刀崩刀特征图

Fig. 7 Schematic diagrams of milling with different types of tools and roughness of the processed sample surface. (a) Ball end milling tool, (b) round nose milling tool; (c) flat end milling tool; (d) roughness of the surface processed by ball end milling tool; (e) roughness of the surface processed by round nose milling tool; (f) broken fracture of flat end milling tool

圆鼻刀加工试样外表面的表面粗糙度,检测区域为 ASHM 试样上表面,每个表面测量 5 组,测量表面具有代表性,结果如图 7(d)~(e)所示。球头刀加工的表面粗糙度 R_a 为 $0.873\ \mu\text{m}$,圆鼻刀加工的表面粗糙度为 $0.211\ \mu\text{m}$,这是由于圆鼻刀与工件之间以线接触的形式进行切削,而球头刀与工件之间以点接触的形式进行切削,球头刀在两次进给之间会产生较大残高从而导致表面质量变差。如图 7(f)所示,在实际加工中,平头铣刀由于没有刀刃底部圆角的过渡,在加工时极易发生崩刀现象而无法使用。平头铣刀的崩刀现象表明了刀刃底部圆角过渡对 ASHM 铣削加工的重要性。对于 GH3536 的 ASHM,圆鼻刀的加工能力显著优于球头刀和平头铣刀,因此,确定圆鼻刀为 GH3536 ASHM 的最优刀具类型。

4 结 论

通过对 GH3536 高温合金 ASHM 工艺参数的研究,获得了最优的 SLM 增材成形致密化工艺参数,并在此基础上重点研究了不同刀具类型对 ASHM 试样外表面质量的影响,主要结论如下:

1) 采用 400 W 的激光功率和 1750 mm/s 的扫描速度可以获得致密度为 99.93% 的 GH3536 高温合金试样,且无明显未熔合及气孔等缺陷;

2) GH3536 的 SLM 纯增材成形试样表面存在微裂纹、黏附粉末以及不规则轮廓,表面粗糙度 R_a 最大为 $20\ \mu\text{m}$;

3) 在 GH3536 ASHM 中,利用球头刀和圆鼻刀加工的试样表面粗糙度 R_a 分别为 $0.873\ \mu\text{m}$ 和 $0.211\ \mu\text{m}$,显著优于纯增材 GH3536 的外表面质量,且圆鼻刀加工时切削深度大,加工能力和效率明显优于球头刀和平头铣刀。

本研究为 GH3536 高温合金的 SLM ASHM 刀具类型选择提供了理论和应用参考,未来将系统研究采用圆鼻刀加工时,主轴转速、进给速度、切削深度对 ASHM 试样表面质量的影响规律。

参 考 文 献

[1] Bai Y C, Zhao C L, Zhang Y, et al. Microstructure and mechanical properties of additively manufactured multi-material component with maraging steel on CrMn steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 802: 140630.

[2] 张学军,唐思熠,肇恒跃,等. 3D 打印技术研究现状和关键技术[J]. *材料工程*, 2016, 44(2): 122-128.
Zhang X J, Tang S Y, Zhao H Y, et al. Research status and key technologies of 3D printing[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(2): 122-128.

[3] Du W, Bai Q, Zhang B. Machining characteristics of 18Ni-300 steel in additive/subtractive hybrid manufacturing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing*

Technology, 2018, 95(5): 2509-2519.

[4] Guo N N, Leu M C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2013, 8(3): 215-243.

[5] 杜巍. 增材减材制造钛合金材料性能完整性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
Du W. Study on performance integrity of titanium alloy materials made by adding materials and reducing materials [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.

[6] 唐成铭,赵吉宾,田同同,等. 基于激光选区熔化与高速切削的增材复合制造系统开发[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(19): 118-122.
Tang C M, Zhao J B, Tian T T, et al. Development of composite manufacturing system of additive and subtractive materials based on laser selective melting and high-speed cutting[J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51(19): 118-122.

[7] Chen L, Xu K, Tang K. Optimized sequence planning for multi-axis hybrid machining of complex geometries[J]. *Computers & Graphics*, 2018, 70: 176-187.

[8] Wüst P, Edelmann A, Hellmann R. Areal surface roughness optimization of maraging steel parts produced by hybrid additive manufacturing[J]. *Materials*, 2020, 13(2): 418.

[9] 张璇,董安平,杜大帆,等. SLM 参数对 GH3536 高温合金显微缺陷和表面质量的影响[J]. *航空材料学报*, 2022, 42(5): 71-80.
Zhang X, Dong A P, Du D F, et al. Effect of SLM process parameters on microscopic defects and surface quality of GH3536 superalloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2022, 42(5): 71-80.

[10] 王玉莹,沈鹏程,梁兴华. SLM 工艺参数对 316L 不锈钢成形零件微观形貌的影响[J]. *广西科技大学学报*, 2023, 34(1): 121-127.
Wang Y Y, Shen P C, Liang X H. Effect of SLM process parameters on micro-morphology of 316L stainless steel forming parts[J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2023, 34(1): 121-127.

[11] 冯思昊,王小齐,韩潇,等. 激光选区熔化 Ti6Al4V 合金的工艺参数优化[J]. *粉末冶金技术*, 2022, 40(6): 555-563.
Feng E H, Wang X Q, Han X, et al. Optimization of process parameters for laser selective melting of Ti6Al4V alloy[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2022, 40(6): 555-563.

[12] 杨海青,王钊勇,肖程波,等. 燃气轮机隔热板 GH22 合金的组织 and 力学性能[J]. *材料工程*, 2010, 38(9): 15-19.
Yang H Q, Wang Z Y, Xiao C B, et al. Microstructure and mechanical properties of alloy GH22 as insulate plates against heat in industrial gas turbine[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2010, 38(9): 15-19.

[13] Sing S L, Yeong W Y. Laser powder bed fusion for metal additive manufacturing: perspectives on recent developments[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2020, 15(3): 359-370.

[14] Kasperovich G, Haubrich J, Gussone J, et al.

- Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2016, 105: 160-170.
- [15] Montero-Sistiaga M L, Liu Z Z, Bautmans L, et al. Effect of temperature on the microstructure and tensile properties of micro-crack free hastelloy X produced by selective laser melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31: 100995.
- [16] Öktem H. An integrated study of surface roughness for modelling and optimization of cutting parameters during end milling operation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 43(9): 852-861.
- [17] 李帅. 增减材复合制造钛合金铣削特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- Li S. Study on milling characteristics of titanium alloy manufactured by adding and subtracting materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [18] 贾天昊. 定向能量沉积镍基高温合金的力学性能及其减材铣削性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- Jia T H. Study on mechanical properties and milling performance of nickel-based superalloy deposited by directional energy[D]. Jinan: Shandong University, 2022.