

多种倾角类比 SLM 成形 TC4 复杂曲面构件性能

肖志玲¹, 李晓峰¹, 何天运², 王浩¹, 何文斌¹, 王涛³

(1. 郑州轻工业大学 机电工程学院, 河南郑州 450002; 2. 河南黄河旋风股份有限公司, 河南长葛 461500;

3. 郑州机械研究所有限公司, 河南郑州 450000)

摘要: 为探究SLM成形TC4钛合金高性能复杂曲面构件, 选择激光束垂直基板扫描, 成形与Y轴成0°、30°、45°、60°四个典型倾角结构作类比分析, 探讨倾斜角度对SLM成形件表面形貌、内部组织及力学性能的影响。为提高SLM成形复杂构件的综合性能, 对45°倾斜角试样进行固溶处理和完全退火处理分析, 讨论热处理对45°倾斜角试样的拉伸性能及断口形貌的影响。结果表明: 不同倾角的TC4试样表面存在球化、沟壑、沟脊和未溶粉末粘连等缺陷, 且倾斜角度越大, 表面沟壑和沟脊缺陷越明显; 而试样倾角变化对其内部组织和显微硬度影响较小。经950℃固溶处理后的试样, α 相溶解, 强度明显下降; 固溶处理试样断口形貌韧窝面积大且深, 试样塑性增加, 与强度分布特征相符。由此可推测, SLM成形复杂曲面构件的表面缺陷较多, 但内部组织性能相对均衡, 且固溶处理能够减少内部缺陷, 提高构件综合性能。

关键词: SLM成形; TC4钛合金; 复杂曲面构件; 倾斜角; 固溶处理

作者简介:

肖志玲(1983-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为结构优化设计、金属材料成形机理。电话: 15290882805, E-mail: xzl03223@126.com

通讯作者:

李晓峰, 男, 硕士。电话: 15738659903, E-mail: 1185003851@qq.com

中图分类号: TG14; TG15

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)01-0017-05

基金项目:

河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(212102210336); 2020年度河南省高校科技创新团队(20IRTSTHN015)。

收稿日期:

2022-04-27 收到初稿,

2022-05-18 收到修订稿。

钛合金(Ti6Al4V)具有无磁、耐热、耐腐蚀、密度小、高温力学性能优异、设计轻量化等优点, 且在复杂环境中具有较高的刚度。因此, 广泛应用于航空航天、石油化工、海洋、核工业、电力、医疗等领域^[1]。但由于钛合金的熔化态活性较高、熔点高的特点, 使传统的钛加工成本较高、材料利用率低、加工困难。而激光选区熔化(Selective Laser melting, SLM)技术是运用高功率激光直接熔化成形获得高致密金属零件的一种快速成形技术^[2]。能使TC4钛合金在较低氧化的情况下快速成形, 解决了传统加工困难的问题。国内外学者对于SLM成形TC4钛合金材料做了大量研究, 侯琨等^[3]研究表明, 选用合适的工艺参数, 能够改善激光选区熔化成形部件的表面质量以及间隙配合。赵春玲等^[4]指出在打印成形时由于误差, 会造成球化、孔隙(孔洞)、应力及裂纹。李琛等^[5]研究发现SLM成形TC4钛合金时金相组织发生变化, 钛合金 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变的 α 相变体选择对微观组织和力学性能有较大影响, 导致组织缺陷。为了减少SLM成形缺陷, 很多学者对SLM成形TC4钛合金试件的热处理工艺做了深入研究, 如Ali等^[6]研究发现将粉末床温度预热至570℃能显著降低SLM TC4合金构件内部的残余应力, 以及提高屈服强度和塑性。Kuma等^[7]实现了在降低拉伸强度的情况下, 通过后处理的退火热处理工艺来提高SLM TC4合金断裂韧性和疲劳裂纹扩展抗力的可能性。巩建强等^[8]发现热处理破坏了SLM成形件的层状结构、微观组织均匀化、降低内部残余应力和优化疲劳性能, 抗拉强度和屈服强度均呈现下降趋势, 而塑性显著改善。

由于SLM成形复杂结构体具有独特的优势, 但学者多采用非倾斜成形方式制样进行研究。本研究设计了4个倾斜角度的成形试验, 用于模拟复杂结构件曲面特征的成形过程, 讨论不同倾角对SLM成形TC4试样的表面形貌特征、内部组织和力学性能的影响。为了进一步提高复杂结构件的综合性能, 对成形试样进行不同形式的热处理, 研究其组织性能的变化及断裂机理, 为TC4钛合金SLM成形复杂结构件的组织控

制和后处理的力学性能优化提供数据支持。

1 试验材料与方法

试验采用优质的TC4钛合金球形粉末，粉末直径在15~53 μm 范围。采用BLT-S200金属3D打印机，最大成形尺寸为105 mm $\times$ 105 mm $\times$ 200 mm。试验设计为激光选区熔化TC4球形粉末成形多种倾斜角度试样，成形实物如图1a所示，试样与垂直于水平面Y轴的夹角 α 分别为0°、30°、45°、60°。成形过程采用激光功率为200 W，光束直径为70 μm ，扫描速度为600 mm/s，粉床层厚度为50 μm ，相邻道间的扫描间距为0.11 mm，扫描策略采用激光光束垂直扫描粉床，隔层扫描路径相同，临层相反，逐层铺粉叠加成形。

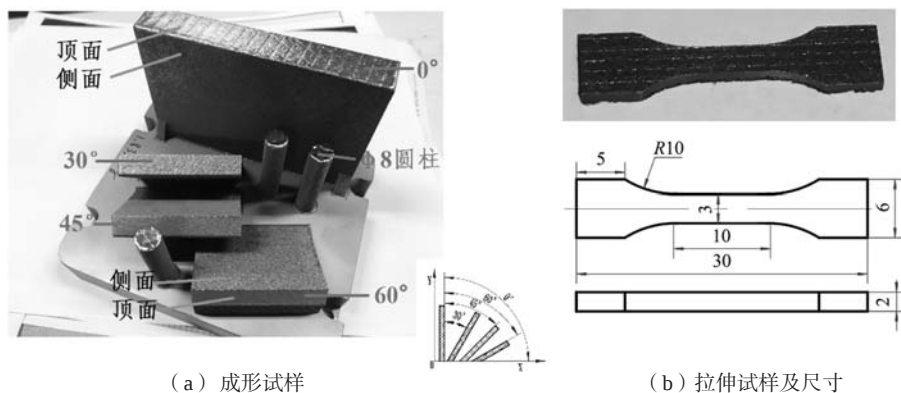


图1 打印试样形状和尺寸

Fig. 1 Schematic diagram of shapes and sizes of the printed samples

2 结果及分析

2.1 不同倾角对成形件表面形貌的影响

各角度试样未经处理的表面结构如图2所示，可看出四种倾斜角度试样表面均存在不同程度的球化、沟壑、沟脊及未熔粉末粘连等缺陷。由图2可知，随着倾斜角度的增加，沟壑、沟脊和球化缺陷增加，但粉末粘连呈现减少的趋势。图2a为0°试样表面结构形貌，可观察到较多的粘连粉末，但沟壑与沟脊缺陷不明显，表面较平滑。而60°试样表面的沟壑较深（图2d），沟壑、沟脊较明显，且表面有球化缺陷。

这是因为，倾斜角度较小时，金属粉末经过激光多次垂直叠加熔化，外表的热扩散相对均匀，层与层之间的熔池凝固一致性较好，表面相对光滑。从图3示意图可知，0°试样熔池的重熔区较大，使得表面温度较高，易产生球形粉末粘连。而随着倾斜角度的增加，如图3中30°、45°、60°成形示意图所示，试样成形层与层之间凝固熔池的水平间距增加，使得外露表面逐渐增加，外露熔池凝固速度加快，易形成表面光滑的沟脊。而外表面垂直方向，两层之间由于部分熔池的重熔及热影响区的叠加，导致夹层较近范围内熔化金属

为了探究不同倾斜角度对试样性能的影响，采用扫描电镜LEO Gemini1530观察各倾斜角度试样表面的形貌特征。在MH-3型显微硬度计上设置载荷为300 g，加载时间为10 s，卸载时间为5 s，测量试样的硬度值，并采用配套的显微镜在放大400倍的物镜下观察压痕形貌。

为了进一步探究不同热处理状态下试样的组织性能变化，对45°倾角试样采用线切割，切割成小型拉伸试样，尺寸如图1b所示，分别对切割后的拉伸试样进行750 °C完全退火（保温2 h、空冷）和950 °C固溶处理（保温1 h、水冷）处理。在万能试验机上进行拉伸试验，记录拉伸强度值，采用LEO Gemini1530扫描电镜观察拉伸断口形貌特征。

散热凝固较慢，在两沟脊之间形成沟壑，且在沟壑区域产生球化和粉末粘连缺陷^[9-11]。由此可见，SLM成形复杂构件，倾斜弯曲部分的表面易产生沟壑、沟脊、球化等缺陷，需要较深的表面处理，才能达到需求。

2.2 不同倾角对成形件显微硬度的影响

图4是不同成形角度TC4钛合金试样的显微硬度，由图4a可知，各倾斜角度试样的显微硬度值相差较小，随角度的变化有小幅升或降的波动，可视为在测量误差的范围之内。试验测得0°倾斜角度试样的显微硬度最大（HV367.5）；30°倾斜角度试样硬度最小（HV356.6），均高于TC4合金传统加工硬度较大值（HV340）^[12]。从图4b显微硬度压痕中，还可观察到激光选区成形试样内部存在较多孔洞。

显微硬度值小幅波动，可见倾斜角度的变化对成形试样的硬度值影响较小。又因激光选区熔化成形（SLM）具有快速冷凝的特性，试样内部组织的 α 相与 β 相呈现交错纤细的网篮状，如图4b所示，使其显微硬度高于锻造加工钛合金构件^[13]。可推测SLM成形TC4复杂曲面结构件内部组织性能相对均匀，受倾斜程度

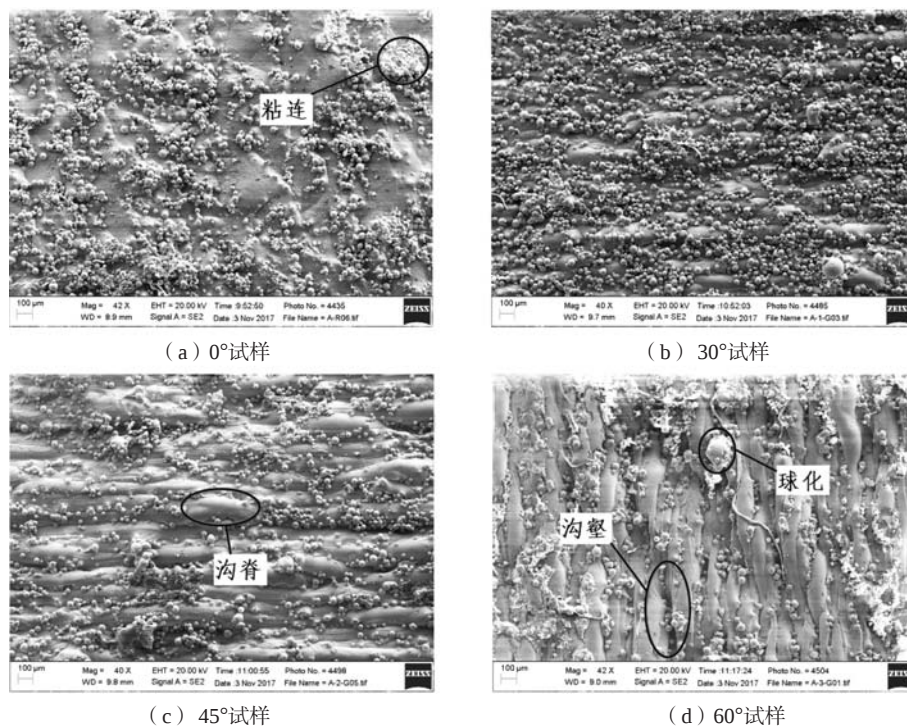


图2 试样的表面形貌

Fig. 2 Surface topographies of samples

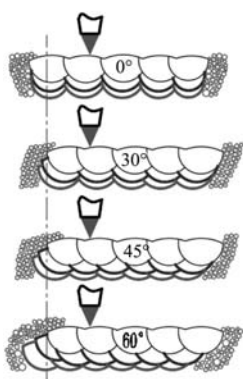
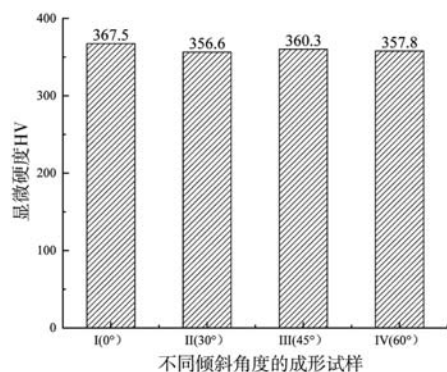


图3 试样各角度成形过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of forming process of the samples at various angles



(a) 显微硬度柱状图

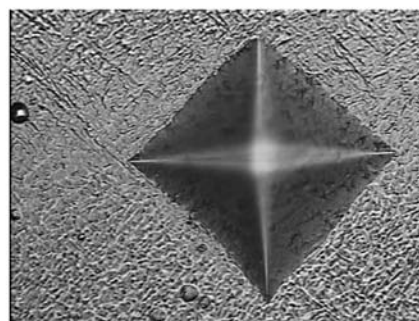
的影响较小,且晶粒相对传统加工方式细小,但压痕中存在较多孔洞,需要进一步的热处理,以降低孔洞缺陷。

2.3 同一倾角不同热处理方式对成形件性能的影响

因测试得出倾斜角度的大小变化对成形件表面形貌特征影响较大,而对试样的内部组织性能影响较小,故仅选择角度为45°试样进行750℃完全退火和950℃固溶处理,用于进一步探究不同热处理状态下试样的组织性能变化规律。

2.3.1 抗拉强度变化分析

图5是不同热处理状态下45°倾斜角试样的抗拉强度变化情况,可见抗拉强度值随着热处理温度的升



(b) 显微硬度压痕图

图4 不同倾斜角度的成形试样的显微硬度和显微硬度压痕图

Fig. 4 Microhardness and its indentation diagrams of formed specimens with different inclination angles

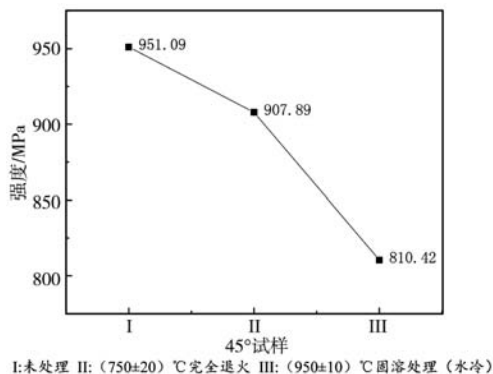


图5 45°试样不同热处理的强度值

Fig. 5 Strength values of the samples of 45° angle with different heat treatment processes

高,呈逐渐下降的趋势。其中,未经热处理试样的抗拉强度最高,其值为951.09 MPa,而固溶处理的抗拉强度最低,其值为810.42 MPa。

这是因为激光熔化沉积的TC4合金组织为 α 与 β 两相交错成编织状的网篮组织,而经固溶处理后,其 α 相的含量和形貌将发生变化,从而影响力学性能。试样经过950 °C固溶处理,其抗拉强度明显降低,这说明在该温度下固溶处理使 α 相溶解,初生 α 相的含量大大降低,强化相减少,导致抗拉强度明显下降,这与鲁媛媛、张豪胤等人试验结论相符^[14-15]。而750 °C完全退火使得钛合金内部 α' 马氏体(过饱和固溶体)分解^[16]

为 α 相,残余应力降低。因此,试样完全退火相比未处理状态的抗拉强度降低了43.2 MPa。

2.3.2 拉伸断口形貌的变化分析

图6是45°角试样进行不同热处理的拉伸断口形貌,可观察到固溶处理和完全退火试样的断口均存在韧窝和孔洞,对比图6b、c,可得950 °C固溶处理断口的韧窝比750 °C完全退火的面积大而深,且可观察到同一面积内固溶处理的试样孔洞量相对较少。

断口韧窝的存在,是由于拉伸载荷大于材料的屈服应力,试样内部晶体滑移,试样发生塑性变形,内部形成显微韧窝,随载荷的不断增大,最终造成试样的断裂失效。因此,可判断两种热处理状态的试样断裂机制均是韧性断裂。950 °C固溶处理断口的韧窝面积大且深,是因为激光选区成形的TC4合金经固溶处理后,板条状 α 相组织之间产生较为细小的 β 相转变组织,使其塑性增加,故在断裂过程中产生较大且深的韧窝。而完全退火温度相对较低,内部发生 α' 马氏体(过饱和固溶体)分解^[16]为 α 相,而 β 相的含量变化较小,故断口形貌的韧窝较小且浅,这与上述试样抗拉强度的变化趋势一致。由于通过高温的固溶处理,TC4合金内部未熔粉末可进一步的熔化,增强层与层之间的熔合。由此可见,950 °C固溶处理可以增加SLM成形TC4合金的塑性。

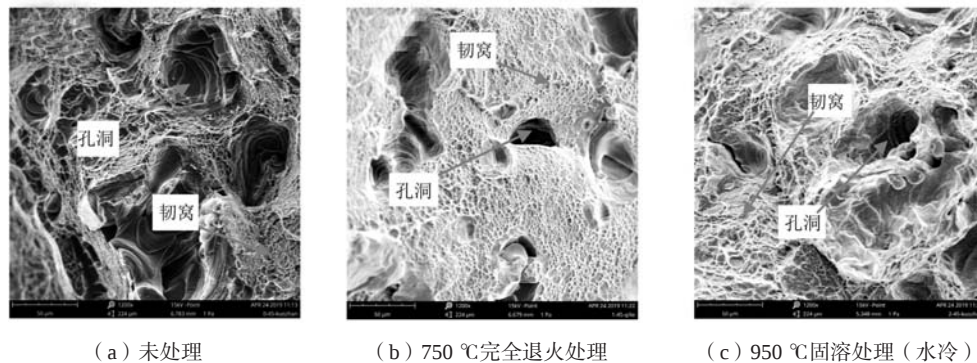


图6 不同热处理工艺45°试样拉伸断口微观形貌

Fig. 6 Microscopic morphologies of tensile fracture of the samples of 45° angle with different heat treatment processes

3 结论

(1) SLM成形多角度构件时,成形试样倾斜角度越大,表面形貌中沟壑、沟脊缺陷越明显,但未熔粉末粘连现象随成形试样倾斜角度的增加而减少。

(2) SLM成形试样倾斜角度的大小对SLM成形试样的显微硬度影响较小,可推测其对复杂曲面结构成

形件性能影响相对较小。

(3) SLM成形TC4合金45°倾角试样的内部组织为纤细的网篮组织,显微硬度值较锻造加工钛合金构件硬度值高。

(4) 950 °C固溶处理后SLM成形件断口韧窝大且深,显著增加试样的塑性变形能力。

参考文献:

- [1] 赵永庆,葛鹏,辛社伟.近五年钛合金材料研发进展[J].中国材料进展,2020,39(Z1):527-534.
- [2] 樊恩想,刘小欣,吴欢欢.激光选区熔化增材制造技术的发展[J].机械制造,2021,59(8):45-49.

- [3] 侯琨, 刘玉德, 石文天, 等. 激光选区熔化成形TC4免装配部件工艺优化 [J]. 有色金属工程, 2021, 11 (10): 1-7.
- [4] 赵春玲, 李维, 王强, 等. 激光选区熔化成形钛合金内部缺陷及其演化规律研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (8): 2841-2849.
- [5] 李琛, 弭光宝, 冯艾寒, 等. 成形态选区激光熔化Ti-6Al-4V钛合金缺陷与微观组织研究进展 [J]. 航空制造技术, 2021, 64 (3): 44-51.
- [6] HAIDER A, LE M, HASSAN G, et al. In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of Selective Laser Melted Ti6Al4V [J]. Materials Science and Engineering A, 2017: 211-220.
- [7] PUNIT K, UPADRASTA R. Microstructural optimization through heat treatment for enhancing the fracture toughness and fatigue crack growth resistance of selective laser melted Ti6Al4V alloy [J]. Acta Materialia, 2019, 169: 45-59.
- [8] 巩建强, 杜文强, 张璐, 等. 经SLM打印成形的TC4合金热处理研究 [J]. 应用激光, 2020, 40 (3): 404-408.
- [9] XIAO Zhiling, CHEN Yuhui, GEORGIADIS A, et al. Analysis of brittle layer forming mechanism in Ti6Al4V sloping structures by SLM technology [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98 (5-8): 1-7.
- [10] KARIMI J, SURYANARAYANA C, OKULOV I, et al. Selective laser melting of Ti6Al4V: Effect of laser re-melting [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 805: 140558.
- [11] XIAO Z, CHEN C, HU Z, et al. Effect of rescanning cycles on the characteristics of selective laser melting of Ti6Al4V [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 122: 105890.
- [12] 左晓婷, 刘鸿彦, 郝运富, 等. 探讨几种提高TC4钛合金表面硬度的方法 [J]. 石油和化工设备, 2019, 22 (10): 78-82.
- [13] 王博涵, 程礼, 崔文斌, 等. 锻造工艺对TC4钛合金组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (23): 17-21.
- [14] 鲁媛媛, 张怡, 郭帅, 等. 固溶温度对3D打印TC4钛合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (11): 171-176.
- [15] 张豪胤, 王文焱, 祝要民, 等. 固溶、时效对TC4钛合金组织和力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (6): 659-661.
- [16] 杨柳, 代广霖, 王莹, 等. 退火工艺对TC4钛合金板材组织和性能的影响 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (1): 122-125.

Performance of TC4 Complex Surface Components Formed by SLM with Various Inclination Angles

XIAO Zhi-ling¹, LI Xiao-feng¹, HE Tian-yun², WANG Hao¹, HE Wen-bing¹, WANG Tao³

(1. Zhengzhou University of Light Industry, School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou 450002, Henan, China; 2. Henan Huanghe Whirlwind Co., Ltd., Changge 461500, Henan, China; 3. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract:

In order to explore the SLM forming of TC4 titanium alloy high-performance and complex curved components, the laser beam was selected to scan in the perpendicular substrate direction, and the forming and Y-axis were formed at four typical inclination angles of 0°, 30°, 45°, and 60°, to investigate the influence of the tilt angle on the surface morphology, internal structure and mechanical properties of the formed parts. In order to improve the comprehensive properties of the complex components formed by the SLM, the solution treatment and complete annealing treatment of 45° inclination angle specimens were analyzed, and the effect of heat treatment on the tensile properties and fracture morphology of the 45° inclination angle specimens was discussed. The results showed that there were defects such as spheroidization, gully, ridge and undissolved powder adhesion on the surface of TC4 samples with different inclination angles, and microhardness had little effect. After solution treatment at 950 °C, the α phase dissolved, and the strength decreased significantly; the fracture morphology of the solution treated sample had a large and deep dimple area, and the plasticity of the sample increased, which was consistent with the strength distribution characteristics. It can be speculated that there were many surface defects of complex curved components formed by the SLM, but the internal structure and properties were relatively balanced, and the solution treatment can reduce internal defects and improve the comprehensive performance of the components.

Key words: SLM forming; TC4 titanium alloy; complex curved surface components; inclination angle; solution treatment