

引文格式:高天锡,王磊,葛佳惺,等. 喷丸强化对增材制造TC4钛合金气孔缺陷的影响[J]. 航空制造技术, 2025, 68(21): 129-135.  
GAO Tianxi, WANG Lei, GE Jiaying, et al. Effect of shot peening on porosity defects in additively manufactured TC4 titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(21): 129-135.

## 喷丸强化对增材制造 TC4 钛合金气孔缺陷的影响\*

高天锡<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 葛佳惺<sup>1</sup>, 冯盛洲<sup>1</sup>, 王勇刚<sup>2</sup>

(1. 苏州科技大学机械工程学院, 苏州 215009;

2. 苏州大学机电工程学院, 苏州 215137)

[摘要] 为探究表面强化对增材制造构件表面或近表面气孔缺陷的影响,基于选区激光熔化制备增材制造 TC4 试样,对其表面进行喷丸强化处理,利用计算机断层扫描技术表征强化前后试样的内部缺陷,进行气孔缺陷三维可视化重构与分析,并对强化前后试样的微观组织、显微硬度和拉伸性能进行了测试分析。结果表明,强化后试样的孔隙率比强化前降低了 0.32%,并有效改变了大气孔的体积及空间几何位置。强化后试样截面硬度提升 23.38%,抗拉强度提高 60.15%,表明喷丸强化细化了晶粒结构,改善了试样的表面完整性与整体力学性能。

关键词: 增材制造; 钛合金; 喷丸强化; 气孔缺陷; 力学性能

中图分类号: V252 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.21.129

### Effect of Shot Peening on Porosity Defects in Additively Manufactured TC4 Titanium Alloy

GAO Tianxi<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, GE Jiaying<sup>1</sup>, FENG Shengzhou<sup>1</sup>, WANG Yonggang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215137, China)

[ABSTRACT] To investigate the effect of shot peening on surface or near-surface porosity defects of additively manufactured components, additively manufactured TC4 specimens were prepared by selective laser melting, and surfaces of the specimen were strengthened by shot peening, internal defects of the specimens were characterized before and after shot peening using computed tomography technology, three-dimensional visual reconstruction and analysis of the porosity defects were carried out, along with testing and analyzing microstructures of the specimens before and after shot peening. Microstructure, microhardness, and tensile properties of the specimens were tested and analyzed before and after strengthening. The results demonstrate that the porosity of the strengthened specimen was reduced by 0.32% compared with that of before, and the volume and spatial geometry of large pores were effectively altered. Post shot peening, the cross-sectional hardness was increased by 23.38% and tensile strength was enhanced by 60.15%, indicating that shot peening can refine the grain structure and improve surface integrity and overall mechanical properties of the specimens.

**Keywords:** Additive manufacturing; Titanium alloys; Shot peening; Porosity defects; Mechanical properties

增材制造技术已成为世界先进制造领域发展最快、技术研究最活跃、关注度最高的学科方向之一<sup>[1-3]</sup>。选区激光熔化(SLM)是一种净近成形及小型复杂零件高精度成形的典型增材制造技术,具有灵活性高、材料利

用率高、无模具设计和制造周期短等优点,在金属增材制造领域发展迅速<sup>[4-5]</sup>。TC4是一种常见的 $\alpha+\beta$ 型钛合金,因具有比强度高、密度低、耐腐蚀性能好等优良特性,在航空、航天、汽车制造和能源生产等领域占据重要

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52105157, 52575185); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX23\_3305)。

地位<sup>[6-8]</sup>。在 SLM 过程中,利用激光作为热源,将预先制备好的金属粉末在粉床上按设计好的路径逐层熔化,得到精细复杂的固体零件。但由于 TC4 粉末的快速冷却和固化速度,材料成形后往往在内部形成不同大小、形状各异的气孔缺陷,显著影响增材制造钛合金的结构完整性。

为了提高增材制造成形零件的性能,国内外许多学者进行了大量试验研究,通过优化工艺参数,结合各类辅助成形工艺和热处理及表面强化技术,来控制成形零件的组织 and 应力,从而减少缺陷的产生。竺俊杰等<sup>[9]</sup>研究了不同扫描策略对两种增材制造技术成形钛合金表面质量与力学性能的影响,发现成形工艺参数直接影响粉末熔化程度、熔合质量和成形显微结构,从而影响成形件的组织与力学性能。Zhao 等<sup>[10]</sup>对 SLM 制造的 TC4 进行热处理,研究退火温度对显微组织、残余应力和力学性能的影响,发现退火加空冷可有效降低残余应力。张天任等<sup>[11]</sup>研究超声冲击对工件表面完整性的影响,对 TC4 工件的不同表面进行超声冲击,以改善工件表面质量和抗疲劳性能。王文强等<sup>[12]</sup>利用计算机 X 射线成像(CR)和计算机断层扫描技术(CT)开展 TC4 的 SLM 成形件内部缺陷射线检测及定量尺寸评价研究,发现 SLM 成形件的设计与实际气孔缺陷尺寸存在差异,设计缺陷尺寸越大,实际打印缺陷的形貌越不平整,球度也越小。

综上所述,国内外学者针对增材制造 TC4 钛合金成形与后处理工艺开展了一些研究工作,然而,目前有关增材制造 TC4 钛合金表面强化后气孔缺陷的定量表征还有待深入、细致地研究,可为进一步研究表面强化对增材制造结构的力学性能影响奠定基础。

本文对 SLM 工艺成形的 TC4 钛合金试样进行喷丸处理后,利用 CT 分析喷丸强化前后试样内部气孔的大小、深度和几何位置,结合 CT 数据统计观察并分析喷丸强化对 TC4 表面或近表面气孔耦合竞争的影响规律,通过微观组织、硬度及力学性能等试验,探究喷丸强化对增材制造 TC4 钛合金的影响。

## 1 试验材料与方法

所用材料为 SLM 工艺制备的 TC4 钛合金,粉末粒径范围为 15~53  $\mu\text{m}$ ,化学成分见表 1,成形工艺参数见表 2。采用 EP-M150 (易加三维)进行选区激光熔化工艺,扫描策略为层间旋转角 67°。在正式打印前,提前 12 h 预热基板和粉末,制造过程中舱室内通氩气,氧气体积分数保持在 0.02% 以下,成形后在氩气氛围中对试样进行 600  $^{\circ}\text{C}$   $\times$  4 h 的去应力退火。增材制造试样包含小方块、拉伸试样和圆棒试样,其中拉伸试样如图 1 所

表 1 TC4 粉末的化学成分(质量分数)

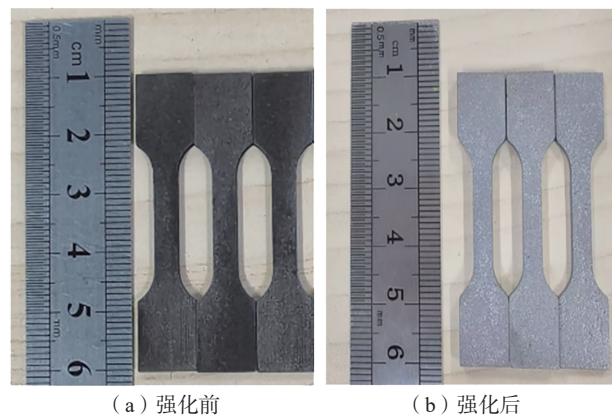
Table 1 Chemical composition of TC4 powder (mass fraction) %

Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
6.2	3.96	0.2	0.12	0.012	0.02	0.002	余量

表 2 TC4 试样的 SLM 工艺参数

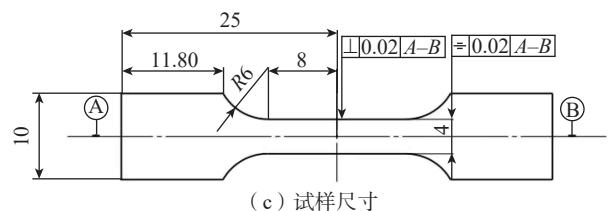
Table 2 SLM process parameters of TC4 specimen

激光功率 / W	层厚 / $\mu\text{m}$	扫描速度 / ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	扫描间距 / mm	光斑直径 / $\mu\text{m}$
80	40	800	0.08	40~60



(a) 强化前

(b) 强化后



(c) 试样尺寸

图 1 SLM 成形的 TC4 拉伸试样(mm)

Fig.1 TC4 tensile specimen by SLM (mm)

示。采用 CS23001 喷丸设备(苏州思必恩金属有限公司)对增材制造 TC4 钛合金的拉伸试样和圆棒试样进行喷丸强化,根据航空零件喷丸强化工艺标准 HB/Z 26—2011 制定强化参数。选用陶瓷丸 A2B30,阿尔门(Almen)强度为 0.12 mmA,覆盖率为 150%。

将制得的 TC4 毛坯加工成光滑圆棒试样,并进行抛光。利用 CNT 150-ICT (广州市吴志影像科技有限公司)对喷丸强化前后试样的中间段进行三维扫描,该系统配备 150 kV 反射 X 射线源,工作原理如图 2 所示。每个试样获得 3600 张二维投影灰度图,电压为 145 kV,电流为 115 mA,曝光时间为 300 ms。后处理使用 Avizo 软件,在工作段中,从表面向内取 4 mm  $\times$  10 mm 的圆柱进行逆向建模,并计算喷丸前后试样的孔隙率(随后计算致密度,致密度 = 1 - 孔隙率),确定气孔的大小和空间分布。

使用 150#~2000# 的 SiC 砂纸打磨 TC4 试样表面和截面,利用腐蚀液(HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=2:1:17,体积比)对试样表面和截面进行刻蚀,并用光学显微镜和扫描电子显微镜(SEM)观察试样表面和截面两个方向的组织形貌。随后采用维氏硬度仪测定试样截面硬度,参数为使用圆形压头、加载载荷 200 g、加载时间 15 s、每个相邻点的间距 100 μm,每个试样测试 11 个点,每个点测试两次,结果取平均值,截面硬度测试示意如图 3 所示。

## 2 结果与分析

### 2.1 孔隙率与缺陷分布

目前,大多数增材制造零件都含有气孔,包括:(1)激光熔化粉末时因“匙孔效应”产生的卷入型气孔;(2)粉末熔化后空心粉末气体来不及上浮溢出而形成的带入

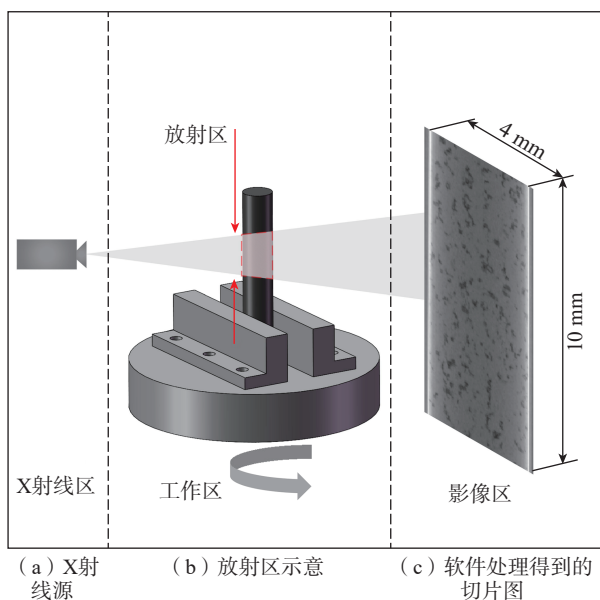


图 2 CT 断层扫描示意图

Fig.2 Schematic diagram of tomographic scanning of CT

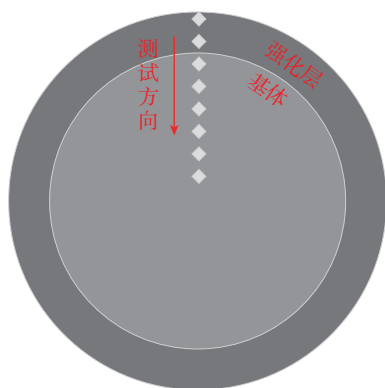


图 3 截面硬度测试示意图

Fig.3 Schematic diagram of cross-sectional hardness test

型气孔;(3)源于粉末表面吸附、溶解析出、反应析出等情况出现的析出型气孔<sup>[13-15]</sup>。这些气孔对材料的力学性能具有不可忽视的影响,SLM 打印的 TC4 钛合金中也含有不同类型的气孔缺陷。对喷丸强化前后的 TC4 试样中间部分各进行一次 CT 扫描分析,对内部缺陷进行可视化重建,获得试样内部气孔的三维特征,计算得到等效直径和球度等信息,对比喷丸前后试样的气孔分布及缺陷变化。

等效直径是指与不规则的孔洞有相同缺陷体积的球体直径。球度是指具有相同缺陷体积的球体表面积与缺陷的实际表面积之比,即

$$\Phi = \frac{\pi^{\frac{1}{3}} \times (6V)^{\frac{2}{3}}}{A} \quad (1)$$

式中, $\Phi$  为球度; $V$  为缺陷体积; $A$  为实际缺陷表面积。

图 4 为喷丸前和喷丸后气孔缺陷的等效直径。根据等效直径将气孔缺陷分为 100 μm 以下、101~200 μm 和 201 μm 以上的气孔缺陷,内部缺陷呈不同形状和大小,在空间中随机分布,不具有明显的方向性。与喷丸强化前相比,喷丸强化后试样的近表面气孔数量减少,近表面或表面的气孔在喷丸强化的作用下冲击孔洞,气孔等效直径变小,使得这些气孔不再属于连通孔,转变为等效直径为≤100 μm 的小孔;大气孔变少的原因是喷丸颗粒对近表面或表面的气孔产生残余压应力,使得某些位置的不规则气孔变小,从 200 μm 以上的气孔转变为 101~200 μm 的气孔,说明喷丸强化能够减小试样中气孔的尺寸,影响气孔的空间分布。

由于 CT 扫描的试样体积较大(125.66 mm<sup>3</sup>),并且大多数小气孔分布在试样内部(经喷丸表面强化后,内部小气孔对零件的力学性能影响较小),因此采用大体素(40 μm/体素)进行分析,获得最终试样的内部气孔缺陷信息。通过 Avizo 软件处理分析,获得喷丸强化后试样的致密度为 97.57%,较强化前(97.25%)增加了 0.32%。如图 4 所示,经过对缺陷数据的统计分析,试样中的气孔尺寸主要分布 100 μm 以下,分别占总缺陷的 83.52% (强化前)和 82.26% (强化后)。气孔缺陷尺寸主要集中在 50 μm 左右,说明小气孔在 SLM TC4 试件中占据了较大的空间尺寸;但大气孔也不能忽略,从气孔三维形貌可知,这些大气孔多为连通孔,并非某单独的大直径封闭孔。喷丸前、后的气孔最大尺寸分别约为 330 μm 和 300 μm,强化后零件的最大气孔直径减小,说明喷丸强化能改变试样大气孔的几何位置和形状,这对改善零件的力学性能具有积极影响。若大气孔分布在零件近表面,则随着气孔缺陷尺寸的增大,其数量也骤降。

采用 40 μm 体素观察喷丸强化后试样近表面的

气孔变化。图5对比了喷丸前后的大气孔形貌,分别在试样的相同位置取孔进行分析,以红色方框表示。分别取喷丸前和喷完后试样中的3个近表面大气孔(图5(a),其中,I~III为喷丸前试样所取的大气孔位置,I'~III'为喷丸后试样相应的大气孔位置),通过软件建模计算进行对比分析,并从三维模型中找出每个气孔的几何位置(用坐标表示)。由图5(b)可知,I、I'处的气孔中心距试样表面约300 μm,II处的气孔中心距试样表面约220 μm。经计算发现,I'处的大气孔总体积较I处的减少了17.44%,在Z方向上向内平移40 μm;II'处的大气孔总体积较II处的减少了16.51%,在Z方向上也向内平移40 μm;III'处的大气孔总体积较III处的降低17.28%,在Y方向上延长40 μm,其余方向上坐标不变。结果表明,喷丸强化对试样近表面分布的大气孔产生了较大影响,气孔体积平均减少约17%。

表3为气孔球度值的分布频率,可以看出,试样中

气孔的球度值集中在0.6~0.8之间,强化前和强化后的累计频率分别为79.16%和79.93%,对应的等效直径为0~100 μm,说明小尺寸的近球形气孔缺陷在试样中占比很大。从图6可以看出,气孔缺陷的球度随等效直径的增大而减小,气孔缺陷形状变得不规则,逐渐出现一些大体积、不规则形状的气孔缺陷,虽然数量较少,但是应力集中较强,是影响试样力学性能的主要因素,若这些不规则大气孔缺陷位于试样表面或其近表面,对力学性能将产生严重的不利影响。

综上所述,在增材制造中,喷丸强化可应用于改善成形部件的表面质量和力学性能。喷丸强化通过陶瓷丸或其他硬质介质的高速撞击,使得增材制造金属材料的表面发生局部塑性变形,并形成压应力区,可以减小近表面的气孔尺寸甚至消除较小气孔,改善气孔的分布并抑制气孔扩展成裂纹,进而有效改善材料的力学性能。

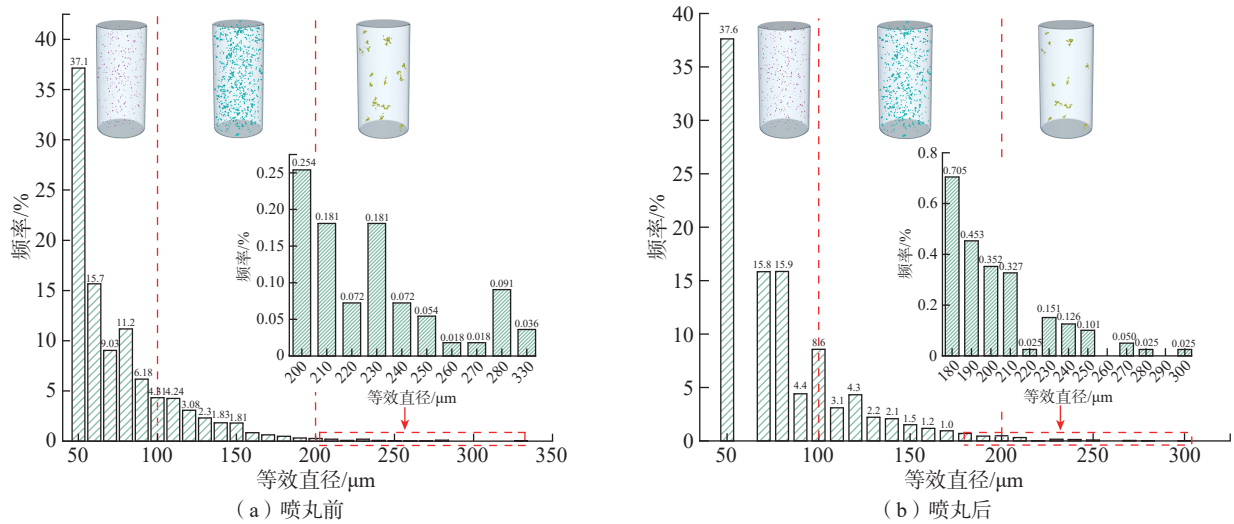


图4 喷丸前后气孔的等效直径

Fig.4 Equivalent diameters of pores before and after shot peening

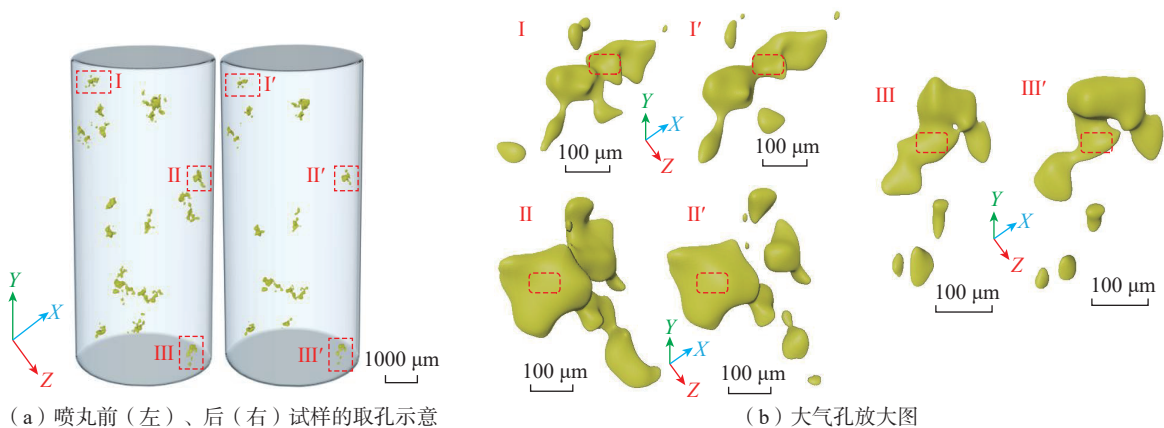


图5 喷丸前后大气孔对比

Fig.5 Comparison of large pores before and after shot peening

## 2.2 微观结构与力学性能

凝固理论阐明凝固的过程始于形核, 固态晶粒从形核的位置开始生长, 生长方向和速度受冷却速率、温度梯度及熔池动态影响, 熔池凝固的典型特征是外延生长和择优生长<sup>[16-17]</sup>。液态金属的结晶过程始于固液界面处的基体晶粒表面, 新晶粒在形核后与基体晶粒以相同的晶体学取向朝着熔池中心生长, 为外延生长<sup>[18-19]</sup>。晶粒生长时, 沿择优生长方向的生长速度最快, 垂直于熔池固液界面的温度梯度最大, 散热速度最快, 有利于晶

粒的生长。因此, 晶粒的择优生长方向与最大温度梯度方向一致时, 晶粒的生长速度最快, 并且会抑制处于不利取向的晶粒生长, 从而形成具有特定取向的柱状晶组织。因为 SLM 成形的 TC4 是在极高温梯度下快速冷却凝固的, 所以  $\beta$  相中析出  $\alpha$  相的过程中, 晶体结构发生改变, 出现  $\alpha'$  马氏体相变, 形成  $\alpha'$  相。此外, 根据凝固理论,  $\alpha'$  相在柱状  $\beta$  相的边界处成核并优先生长, 并沿快速冷却方向生长, 不同相之间的边界比较平直。

图 7 为 SLM 成形 TC4 试样的微观组织形貌, 由图 7 (a) 可知, 试样表面由大量不规则针状  $\alpha'$  相结构组成, 沿特定的晶体学方向生长、交错分布, 形成具有一定取向的结构, 针状  $\alpha'$  相之间相互成  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  或  $90^\circ$  夹角, 为树枝晶状组织, 并且在针状  $\alpha'$  相间可以观察到柱状  $\beta$  相基体较为连续, 填充了  $\alpha'$  相之间的空间, 但也有小孔洞的存在。由于 SLM 成形时的快速熔凝技术, 温度梯度在熔池前沿部分极大, 熔池冷却速度为  $10^6 \sim 10^8$  K/s<sup>[20-21]</sup>, 因此在图 7 (b) 中观察到沿增材方向的典型鱼鳞状形貌, 呈网篮状的  $\alpha' + \beta$  相分布于左右两侧。魏氏组织(图 7(a))是在冷却过程中形成的。综上可知,

表 3 气孔球度分布频率

Table 3 Distribution frequency of pore sphericity

等效直径/ $\mu\text{m}$	球度	强化前累积频率/%	强化后累积频率/%
0~50	0.77~0.81	37.13	37.62
50~100	0.59~0.76	42.03	42.31
100~150	0.41~0.58	15.77	14.92
150~200	0.34~0.40	4.10	4.13
200~300	0.20~0.33	0.97	1.01

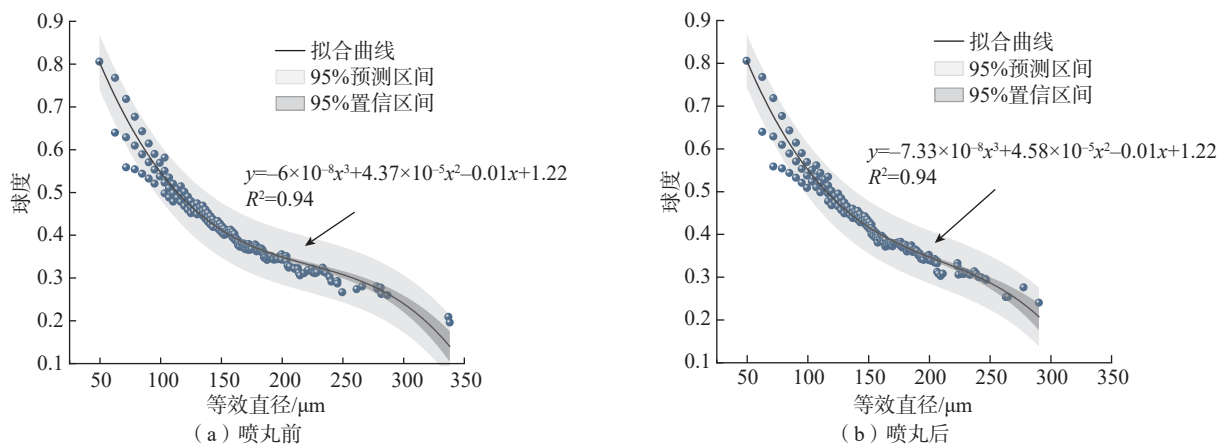


图 6 喷丸前后的气孔球度统计结果

Fig.6 Statistic results of pore sphericity before and after shot peening

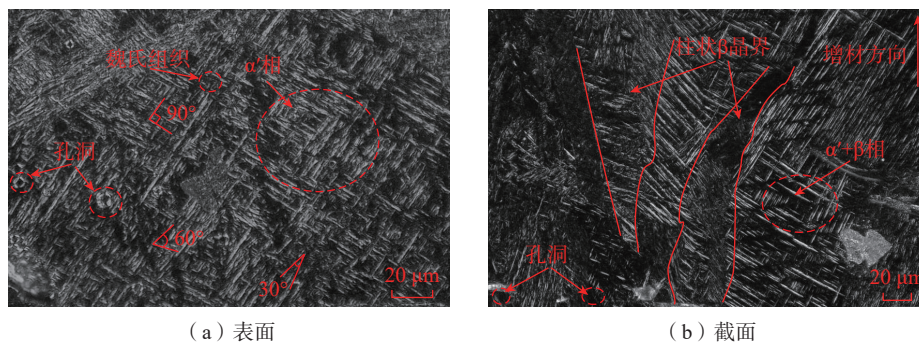


图 7 SLM 成形的 TC4 试样微观组织

Fig.7 Microstructure of TC4 specimen by SLM

在 SLM 打印时,过快的冷却速度和过大的温度梯度对晶粒的生长方向产生了显著影响。

前期研究也表明,经喷丸强化后,增材制造 TC4 材料表层发生较为严重的塑性变形,晶粒出现明显细化<sup>[22-23]</sup>。江庆红<sup>[24]</sup>在研究中发现,喷丸强化后增材制造 TC4 钛合金的显微组织主要为针状晶,越靠近表层的组织越细密,随深度的增加梯度增大。Chen 等<sup>[25]</sup>对 SLM 成形的 TC4 钛合金进行喷丸强化,观察到顶部处理层有明显的变形迹象,晶粒极度细化,使得近表层的初始柱状  $\beta$  晶粒和内部针状  $\alpha/\alpha'$  马氏体的识别变得困难,随着深度的增加,外加应变和应变速率,与之相关的表面晶粒细化和变形迹象逐渐减弱。这些微观组织特征均会对强化后 TC4 钛合金的力学性能产生显著影响。

魏氏组织的形成能有效阻碍位错运动,提高 TC4 的强度和硬度。对比喷丸强化前后试样的硬度,结果如图 8 所示。其中, #4 为未强化的截面硬度分布; #1、#2 和 #3 为强化后试样的截面硬度分布。可知,喷丸强化前的试样截面硬度为 387.1 HV,喷丸强化后试样的平均截面硬度为 477.6 HV,提高了 23.38%。此外,从试样表面向内至深度为 0.2 mm 左右,试样的硬度变化不再明显,即喷丸强化在试样截面引入的强化层厚度约为 0.2 mm。

对喷丸强化前后的拉伸试样进行力学测试,结果如图 9 所示。可以看出,喷丸前 SLM 成形 TC4 钛合金的屈服强度为 705.07 MPa,抗拉强度为 808.87 MPa;喷丸后 SLM 成形 TC4 钛合金的屈服强度为 1152.78 MPa,抗拉强度为 1295.41 MPa (较强化前提高了 60.15%)。喷丸强化提高 TC4 钛合金力学性能的主要原因是,弹丸改善了成形件表面组织的晶粒细化且增加了残余压应力,这与 Chen<sup>[25]</sup>和 Zhang<sup>[26]</sup>等的研究结果一致。

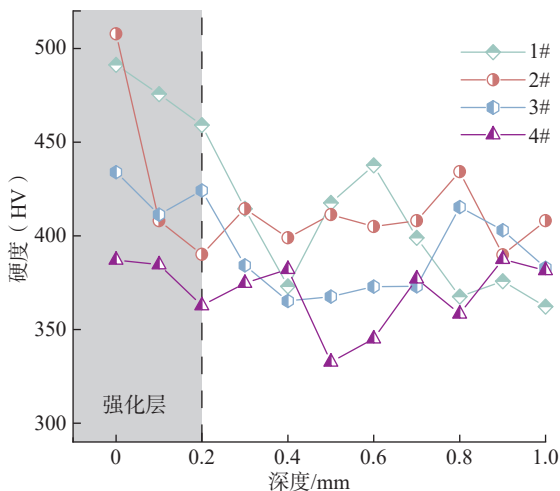


图 8 SLM 成形 TC4 试件的截面硬度

Fig.8 Cross-sectional hardness of TC4 specimen by SLM

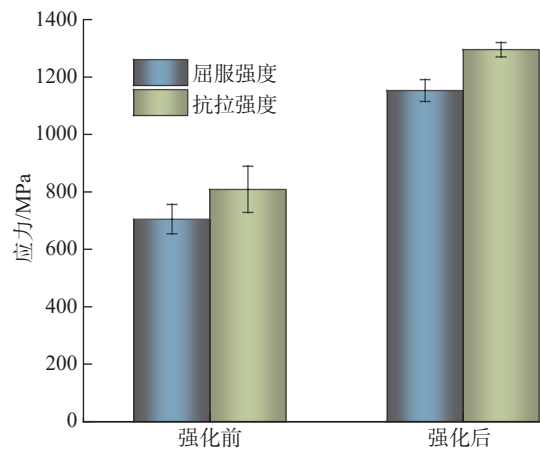


图 9 喷丸强化前后的力学性能对比

Fig.9 Comparison of mechanical strengths before and after shot peening

### 3 结论

(1)通过计算机断层扫描技术(CT)分析发现,喷丸强化后 TC4 试样的内部大气孔体积和几何形状均发生变化,气孔体积有所减小,且气孔向试样内部偏移。喷丸强化对大气孔几何尺寸的调整和空间分布的改善,使得合金致密度提升了 0.32%,对提高材料力学性能具有重要意义。

(2)随着等效直径的增大,气孔缺陷的球度减小,形状变得不规则,对力学性能的影响越显著。喷丸处理能够有效降低大尺寸、不规则气孔的应力集中效应,提高增材制造 TC4 钛合金的拉伸性能。

(3)经喷丸处理后,选区激光熔化(SLM)成形的 TC4 试样的性能显著提升,截面硬度提高了 23.38%,抗拉强度提高了 60.15%。喷丸强化可细化晶粒结构,在截面引入约 0.2 mm 厚的强化层,从而提高材料的综合力学性能。

### 参考文献

[1] 任慧娇,周冠男,从保强,等.增材制造技术在航空航天金属构件领域的发展及应用[J].航空制造技术,2020,63(10):72-77.  
REN Huijiao, ZHOU Guannan, CONG Baoqiang, et al. Development and application of metal additive manufacturing in aerospace field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(10): 72-77.

[2] 卢秉恒.增材制造技术——现状与未来[J].中国机械工程,2020,31(1):19-23.  
LU Bingheng. Additive manufacturing—Current situation and future[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 19-23.

[3] 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.  
LU Bingheng, LI Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Mechanical Manufacturing and Automation, 2013, 42(4): 1-4.

- [4] ZHU Y, ZOU J, YANG H Y. Wear performance of metal parts fabricated by selective laser melting: A literature review[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2018, 19(2): 95–110.
- [5] CAI C, WU X, LIU W, et al. Selective laser melting of near- $\alpha$  titanium alloy Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V: Parameter optimization, heat treatment and mechanical performance[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 57: 51–64.
- [6] LAN L, XIN R Y, JIN X Y, et al. Effects of laser shock peening on microstructure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy fabricated via selective laser melting[J]. Materials, 2020, 13(15): 3261.
- [7] 谢成木. 钛及钛合金铸造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- XIE Chengmu. Titanium and titanium alloy casting[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [8] 窦振, 张安峰, 王豫跃, 等. 不同热处理工艺对选区激光熔化 TC4 动载性能及各向异性的影响[J]. 航空制造技术, 2024, 67(6): 100–108.
- DOU Zhen, ZHANG Anfeng, WANG Yuyue, et al. Effects of different heat treatment processes on dynamic load properties and anisotropy of TC4 titanium alloy by selective laser melting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(6): 100–108.
- [9] 竺俊杰, 王优强, 倪陈兵, 等. 激光增材制造钛合金微观组织和力学性能研究进展[J]. 表面技术, 2024, 53(1): 15–32.
- ZHU Junjie, WANG Youqiang, NI Chenbing, et al. Research progress on microstructure and mechanical properties of titanium alloy by laser additive manufacturing[J]. Surface Technology, 2024, 53(1): 15–32.
- [10] ZHAO Y T, YUE Y K, DENG W L, et al. Effects of post-heat treatments on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 1155–1164.
- [11] 张天任, 蒋睿嵩, 王栋辉, 等. TC4 钛合金加工表面的超声冲击强化表面完整性实验研究[J/OL]. 机械科学与技术, 2023: 1–12. [2023–12–25]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JXKX20231221000&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- ZHANG Tianren, JIANG Ruisong, WANG Donghui, et al. Experimental study on surface integrity of machined surface of TC4 titanium alloy strengthened by ultrasonic shock[J/OL]. China Industrial Economics, 2023: 1–12. [2023–12–25]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JXKX20231221000&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [12] 王文强, 危荃, 宋鸿玉, 等. 激光选区熔化成形件射线检测及缺陷尺寸评价技术研究[J]. 失效分析与预防, 2022, 17(3): 162–168.
- WANG Wenqiang, WEI Quan, SONG Hongyu, et al. Research on radiography testing and defect size evaluation of selective laser melting parts[J]. Failure Analysis and Prevention, 2022, 17(3): 162–168.
- [13] SOLA A, NOURI A. Microstructural porosity in additive manufacturing: The formation and detection of pores in metal parts fabricated by powder bed fusion[J]. Journal of Advanced Manufacturing and Processing, 2019, 1(3): e10021.
- [14] TAN J L, TANG C, WONG C H. A computational study on porosity evolution in parts produced by selective laser melting[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49(8): 3663–3673.
- [15] 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.
- [16] DAVIS S H. Theory of solidification[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [17] LEUDERS S, THÖNE M, RIEMER A, et al. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 48: 300–307.
- [18] SALLICA-LEVA E, CARAM R, JARDINI A L, et al. Ductility improvement due to martensite  $\alpha'$  decomposition in porous Ti-6Al-4V parts produced by selective laser melting for orthopedic implants[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2016, 54: 149–158.
- [19] 李佳宜, 刘玉德, 周裕圣, 等. 激光重熔对 TC4 选区激光熔化成形质量及力学性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0514006.
- LI Jiayi, LIU Yude, ZHOU Yusheng, et al. Effect of laser remelting on quality and mechanical properties of selective laser melting of TC4[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 0514006.
- [20] QIAN M, XU W, BRANDT M, et al. Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties[J]. MRS Bulletin, 2016, 41(10): 775–784.
- [21] YANG J J, HAN J, YU H C, et al. Role of molten pool mode on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials & Design, 2016, 110: 558–570.
- [22] YANG Q, CHENG J H, GUAN H J, et al. Investigation of wet shot peening on microstructural evolution and tensile-tensile fatigue properties of Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 291: 126635.
- [23] YI Y X, YIN F, ZHAI J J, et al. Microstructure evolution and numerical modeling of TC4 titanium alloy during ultrasonic shot peening process[J]. Metals, 2024, 14(3): 275.
- [24] 江庆红. 喷丸处理对增材钛合金性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- JIANG Qinghong. EFFECT of shot peening on properties of additively manufactured titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [25] CHEN M, DENG W L, LIU H B, et al. Enhancement of fatigue properties of selective laser melting fabricated TC4 alloy by multiple shot peening treatments[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 182: 108215.
- [26] ZHANG Q, DUAN B B, ZHANG Z Q, et al. Effect of ultrasonic shot peening on microstructure evolution and corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 1090–1099.

通信作者: 王磊, 教授, 研究方向为机械结构强度、疲劳延寿、表面完整性保障与评价、增材制造技术。

(责编 向阳)