

引用格式:邹定锦,张亮,吴文恒.激光粉末床熔融成形 TC4 钛合金疲劳与断裂韧性研究进展[J].材料工程,2026,54(9):66-75.
ZOU Dingjin, ZHANG Liang, WU Wenheng. Research progress in fatigue and fracture toughness of TC4 titanium alloy formed by laser powder bed fusion[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(9): 66-75.

激光粉末床熔融成形 TC4 钛合金疲劳与 断裂韧性研究进展

邹定锦,张 亮*,吴文恒

(上海材料研究所 上海 3D 打印材料工程技术研究中心,上海 200437)

摘要:激光粉末床熔融成形(LPBF)TC4 钛合金,是现阶段航空、航天、医疗、电子等领域实现轻量化和一体化制造的重要技术途径。本文系统总结了激光粉末床熔融成形 TC4 钛合金的微观组织与缺陷的影响规律及其机理,详细综述了国内外研究者在工艺参数及热处理方式对于 LPBF 成形 TC4 钛合金拉伸性能影响的研究现状。在此基础上,针对现阶段激光粉末床熔融 TC4 钛合金的应用瓶颈问题,对 LPBF 成形 TC4 钛合金的疲劳性能和断裂韧性的研究现状进行了系统总结,在提出改善增材制造 TC4 钛合金疲劳性能和断裂韧性的后处理方式的同时展望其发展趋势。

关键词:激光粉末床熔融;TC4 钛合金;拉伸性能;断裂韧性;疲劳性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000353 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000353

中图分类号: TB31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2026)09-0066-10

Research progress in fatigue and fracture toughness of TC4 titanium alloy formed by laser powder bed fusion

ZOU Dingjin, ZHANG Liang*, WU Wenheng

(Shanghai Engineering Research Center of 3D Printing Materials, Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

Abstract: The application of laser powder bed fusion (LPBF) on TC4 titanium alloy is an important way to achieve lightweight and integration in aviation, aerospace, medical, electronics, and other fields at present. In this paper, the effects of laser powder bed fusion on microstructure and defects of TC4 titanium alloy and its mechanism are systematically summarized. The research status of the influence of LPBF parameters and heat treatment methods on the tensile properties of TC4 alloy formed by LPBF is reviewed in detail as well. On this basis, in view of the bottleneck on application of LPBF TC4 titanium alloy at the present stage, the research status of fatigue properties and fracture toughness of TC4 alloy formed by LPBF is systematically summarized, and the effective post processing methods to improve the fatigue property and fracture toughness of TC4 titanium alloy fabricated by additive manufacturing are pointed out, and the development trends are also discussed.

Key words: laser powder bed fusion; TC4 titanium alloy; tensile property; fracture toughness; fatigue property

钛合金具有低密度、高比强度、耐高温和耐腐蚀等特点,因此在航空航天领域得到了广泛应用。在航空航天领域,TC4 钛合金应用量占整个钛合金应用量的 50% 以上^[1]。然而,切削、锻造、铸造等传统加工方法不仅工艺繁杂,难以成形复杂结构,且材料的重复

利用率低,加工成本高。与传统加工方法相比,增材制造(additive manufacturing, AM)在钛合金加工方面具有研制周期短、无需模具与大型设备、可一体化成形复杂结构等优点。

目前对于 LPBF 成形的 TC4 合金的研究主要集

中在组织、缺陷以及静态的拉伸性能上。但随着增材制造TC4的应用面不断拓展,疲劳性能和断裂韧性等动态力学性能开始得到人们的关注。尤其是在航空航天领域,随着飞行器性能的提高与结构的复杂化,早年间以静强度和刚度为标准的结构设计已无法满足强度要求,目前的TC4结构件设计注重使用中的疲劳寿命与断裂韧性这类动态力学指标。考虑到TC4常用作航空航天领域中的复杂结构件,对于打印的精度有较高的要求。在常见的金属增材制造技术中,激光粉末床熔融(laser powder bed fusion, LPBF)技术由于具有优良的成形精度、构件表面质量以及较为简单的打印环境,成为增材制造TC4的不二之选。本文从LPBF成形TC4的特征出发,总结了其对拉伸性能的影响,并以此为基础重点综述了国内外在疲劳性能和断裂韧性方面的研究进展,提出了未来可能的研究方向。

1 激光粉末床熔融TC4合金组织与缺陷

1.1 沉积态组织特征

LPBF过程中的高冷却速率以及分层制造过程的重熔导致沉积态TC4试样在横截面(XOY面)和纵截面(XOZ面)上具有不同的组织特征。XOY面的组织主要为初生 β 相和其内部的针状与板条状马氏体 α' 。LPBF过程中产生的熔池冷却速率极高,可达 10^4 K/s,远远超过了发生马氏体相变所需的410 K/s,所以 β 相中析出了马氏体 α' 相。XOY面的组织形貌受工艺参数和扫描策略的影响较大。孙靖等^[2]的研究结果表明,保持激光功率不变时 β 相及内部的马氏体 α' 相会随着扫描速度的下降而逐渐粗化。谷雪忠^[3]对比了不同熔覆层间扫描角度为 90° 和 67° 的情况。扫描角度为 90° 时 β 晶粒间以相互垂直的棋盘网格分布,而扫描角度为 67° 时网格则近似六边形,这种差异是不同熔覆层之间熔道交叉形状的差异导致的。

同时,LPBF成形过程中不同高度的热输入和热循环状况也存在较大的差异,导致不同熔覆层之间XOY面的组织形貌也不尽相同。Xu等^[4]研究发现靠近基板的部位因为积累的热量更多,马氏体 α' 相会分解为 $\alpha+\beta$ 相,组织为板条状 $\alpha+\beta$ 相且较为粗大,而靠近顶端的部分热量累积少,组织为 β 相和针状马氏体 α' 相。对于热循环次数,马尧^[5]的研究结果表明,试样底部由于经历的热循环次数最多可生成四次马氏体 α' 相,不同批次的马氏体分别与上一级的马氏体垂直析出而一次马氏体相与 β 相垂直析出。越接近顶部经历的热循环次数越少,马氏体的种类与体积也随之减少。

XOZ面的组织为穿过多个粉层的 β 相柱状晶,其内部分布有针状马氏体 α' 。这是激光打印过程中对上一层的粉层的重熔导致的,先前存在的柱状晶会沿熔池边界外延生长,最终形成沿沉积方向的粗大柱状晶。柱状晶内部的针状马氏体 α' 常与柱状晶呈特定角度生长且针状马氏体之间相互平行或垂直,这种位相关系由马氏体的成核难度和最大热通量的方向共同决定。XOZ面的组织形貌主要受工艺参数影响,谷雪忠^[3]研究了 52 J/mm^3 和 23.8 J/mm^3 两种能量密度下LPBF成形TC4 XOZ面的组织形貌,发现当能量密度足够使上一层粉层达到 β 相变温度时, β 柱状晶可以跨粉层连续生长,反之则难以形成粗大且连续的柱状晶。

1.2 缺陷

LPBF过程中常会出现球形的气孔、不规则的未熔合区域以及裂纹。Hojjatzadeh等^[6]验证了LPBF过程中气孔形成的六种机制,包括原始粉末中就存在的气孔无法逃逸、易挥发元素形成的蒸气无法逃逸、金属蒸气对熔池的反冲压力使熔池振荡形成了气孔、金属液滴飞溅下落到熔池时产生了气孔、已存在裂纹的基体重熔时由裂纹释放出气孔、匙孔底部的气体由于激光能量过大无法逃逸。此外,Zhou等^[7]发现传统LPBF过程中作为保护气氛的惰性气体也会进入基体形成气孔,将打印的环境由惰性气体变为真空可降低LPBF成形TC4的孔隙率。

未熔合区域常存在较多未熔化的颗粒,同时容易形成锋利的边缘,其成因主要为激光的能量密度不足,无法形成连续的熔体。裂纹指成型件内部的小裂纹,张升等^[8]认为是高温梯度产生的残余应力导致了裂纹的产生,这也是目前较为普遍的观点。在此基础上Zhu等^[9]认为夹杂、熔合不良、气孔等部位容易造成应力集中从而形成裂纹源。蔡伟军^[10]发现P与Si等元素会产生晶间的液态薄膜成为热裂纹的诱因。

研究发现,通过调整工艺参数,上述三种缺陷均可得到一定的改善。赵春玲等^[11]发现随着激光能量密度增加,缺陷逐渐由不规则形转向球形,缺陷的尺寸先减小后增加,这证明LPBF成形TC4的能量密度存在一个最佳工艺窗口。Zhou等^[7]的研究结果表明,在真空(1 Pa)条件下的工艺窗口为 $800\sim 1333\text{ J/mm}^3$ 。对于传统的LPBF成形TC4,段伟^[12]发现能量密度在 $19.49\sim 58.48\text{ J/mm}^3$ 范围内时,试样的致密度可达99%以上,且在 29.24 J/mm^3 附近致密度大于99.9%。除调整打印参数外,热等静压(hot isostatic pressing, HIP)也是改善LPBF成形件缺陷状况的常用手段。HIP通过高温高压可以使工件中大部分的孔隙和裂纹

闭合,吕周晋等^[13]对致密度99.4%LPBF成形TC4试样进行HIP处理后,致密度超过99.8%,材料密度达到4.415 g/cm³以上,已经接近TC4的理论密度。HIP虽然能消除绝大部分缺陷,但其造成的组织粗化会减弱TC4的抗疲劳性能^[14]。

1.3 残余应力

LPBF成形的加热和冷却过程都极快,成形过程中不同部位之间会形成较大的温度梯度,当不同部位的膨胀和收缩不一致时便会产生残余应力。残余应力会使零件容易开裂甚至断裂^[15],因此需要设法减小乃至消除LPBF过程产生的残余应力。

减小温度梯度最简单的解决方法是对基板进行预热。Roberts^[16]通过有限元模拟发现,将预热温度从40℃提高到300℃可以使TC4上表面的残余拉应力从737.8 MPa降低至355.9 MPa,减少了50%以上。而Ali等^[17]将预热温度提高到770℃时发现TC4零件上表面的残余应力基本消失。热处理也是减小残余应力的常见手段,其可以将亚稳组织转变为平衡组织,消除晶粒间的位错聚集,从而减小残余应力。Leuders等^[18]通过800℃/2 h的退火处理将LPBF成形TC4表面沿沉积方向和扫描方向的残余应力分别由230 MPa和120 MPa降低至10 MPa和5 MPa。张霜银等^[19]通过去应力退火将LPBF成形TC4 Y方向和Z方向的平均残余应力分别由-114.88 MPa和-82.34 MPa降低至-49.01 MPa和0.52 MPa,降幅达59.8%与72.3%。此外,LPBF的工艺参数也会对残余应力造成影响。Levkulich等^[20]与Vrancken^[21]发现随着激光功率的增加,LPBF成形的TC4试样的残余应力会降低,他们认为是冷却速率随着激光功率增加而降低导致的。但激光能量过高则会增加与相邻层的温度梯度,反而会产生较大的残余应力^[22]。梁晓康等^[23]发现TC4试样在沉积方向上有较大的残余拉应力,Anderson等^[24]的实验结果也表明在x方向和z方向上应力值近似抛物线分布,若改变每层的扫描路径则可使层与层之间的应力状态相等。孙新发^[25]对旋转角为0°、67°和90°的扫描策略进行了数值仿真,其中旋转角为67°时应力的各向异性最低。

2 激光粉末床熔融TC4合金拉伸性能

与传统工艺制备的TC4合金相比,LPBF成形的TC4合金具有高强度低塑性的特点。LPBF过程中远超传统工艺的冷却速率形成了大量的针状马氏体 α' ,与传统TC4合金中的 $\alpha+\beta$ 相相比有着更高的硬度与强度但塑性很低^[26]。

沉积态的TC4合金拉伸性能主要受打印参数的影响。吴慧敏等^[27]和雷蕾^[28]都对激光功率和扫描速度对拉伸性能的影响进行了研究,结果表明LPBF成形TC4合金的拉伸性能由内部缺陷决定,致密度最高、缺陷最少的试样不论是抗拉强度还是断后伸长率都要高于其他试样。LPBF成形TC4合金XOY面与XOZ面的组织形貌存在明显差异,导致其拉伸性能也表现出明显的各向异性。焦泽辉等^[29]测量了水平和垂直方向的拉伸性能,其中水平拉伸试样的抗拉强度和屈服强度都要高于垂直拉伸试样而断后伸长率差别不大。这是因为水平方向 β 晶界的数量要多于垂直方向,对位错滑移的阻碍更大^[30],且水平拉力的方向垂直于 β 柱状晶而垂直拉伸力的方向与柱状晶平行;另外,垂直方向为试样的沉积方向,层间的结合强度会小于层内的结合强度,也导致了垂直拉伸性能不如水平拉伸性能。各向异性可以通过后续的热处理消除,窦振等^[31]通过固溶时效处理使拉伸性能的各向异性水平 $\leq 1.2\%$ 。

沉积态TC4塑性的提升主要依靠后续的热处理。目前主流的研究方向为退火处理和固溶时效处理。退火处理时,随着退火温度的升高,马氏体 α' 会逐渐分解为 α 相和 β 相,当温度越接近 β 转变温度时, β 相含量越多^[32]。由于Al和O等强化元素会在 α 相中富集^[33], β 相的强度会低于 α 相;同时 β 相为BCC结构而 α 相为HCP结构, β 相的滑移系多于 α 相,变形协调能力更强。因此退火温度越高,试样的强度越低,塑性越强。但崔丽等^[32]发现随温度上升,断后伸长率先增加后下降,其原因可能为高温时 α 相粗化严重且容易形成集束,降低了塑性变形的抗力。通常来说退火温度在800℃左右时有较好的强度塑性比。固溶时效处理通常会在固溶过后进行水冷来获得马氏体 α' ,在时效过程中马氏体 α' 会分解成 β 相和弥散 α 相。由于组织大体上保留了原本的 $\alpha+\beta$ 相的形貌,具有较好的伸长率。同时细小的弥散 α 相不仅能阻碍位错的运动,还能减少位错滑移的启动,从而提高了强度^[34]。高星等^[35]指出固溶时间不宜过长,否则会使 α 片层过度粗化从而降低塑性。孙兵兵等^[34]通过940℃和900℃两次固溶水冷处理来控制 α 片层的尺寸,再经过600℃的时效处理后试样的抗拉强度为1158 MPa,伸长率为11.3%,均大于940℃炉冷试样的1061.5 MPa和10.8%。通过固溶和时效过程分别调节片层 α 相和弥散 α 相的大小可以使TC4合金获得良好的强度塑性比。但其认为粗的 α 片层有利于协调变形和位错增殖从而提高试样的塑性,这与前文崔丽和高星等的观点有所出入,因此具体的强度塑性调节机制还有待进一步研究。

通过系统分析现阶段激光粉末床熔融成形 TC4 合金的研究,不同工艺条件下 LPBF TC4 的拉伸性能如图 1^[3,12,27-29,31-32,34-46]所示。可以明显看出,TC4 的拉伸性能与伸长率总体上呈现反比趋势,如图 1(a)所示。图 1(b)为不同工艺下 TC4 抗拉强度和伸长率的上下限,从图中可以看出沉积态的 TC4 强度高、塑性低,所有的沉积态强度都达到了 1000 MPa 以上,但其伸长率的上下限均为最低;单独的固溶处理效果与退火处理类似,但与退火相比会造成更明显的强度下降;在固溶

的基础上增加时效处理则可以增强其强度,在图 1(a)中表现为伸长率相近时,固溶+时效处理的试样强度大多高于单独的固溶处理试样;从图 1(b)中可以看出,循环热处理由于加热时间充分,大多都拥有较高的伸长率,其强度范围与退火及固溶+时效处理相近,但反复的升温 and 降温过程不仅增加了热处理所需的时间,而且会使流程十分繁琐,因此应用并不广泛。从工艺的复杂度和强塑性的结合度来考虑,退火和固溶+时效两种热处理方式为目前 LPBF TC4 合金的首选。

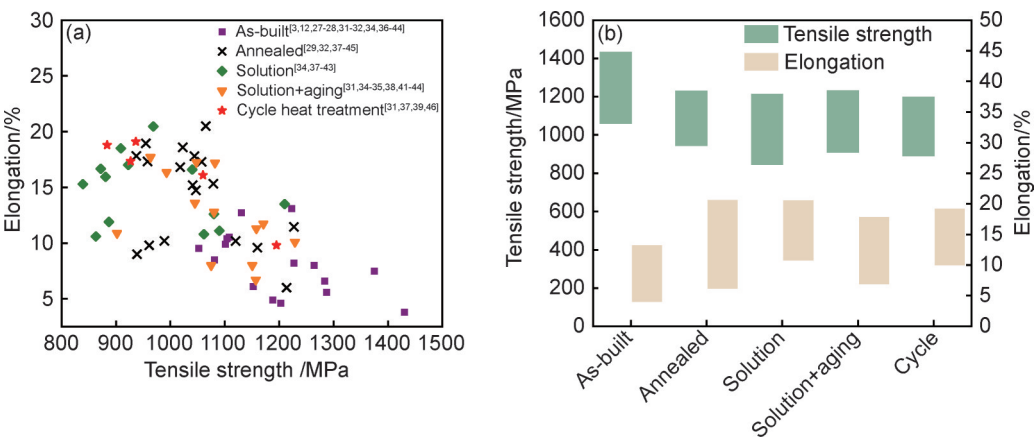


图1 不同工艺条件下 LPBF TC4 的拉伸性能^[3,12,27-29,31-32,34-46]
(a)分布图;(b)上下限柱状图
Fig.1 Tensile properties of LPBF TC4 under different conditions^[3,12,27-29,31-32,34-46]
(a)scatter diagram;(b)histogram with upper and lower limit

3 激光粉末床熔融 TC4 合金疲劳性能

疲劳性能最常用的表征为疲劳极限 σ_f (即试样在 1×10^7 次循环周次后仍不会发生断裂的最大应力),不同增材制造方式下制件的疲劳强度如表 1 所示^[47-55]。疲劳性能作为动态力学性能,与静态的拉伸性能存在一定区别。首先,缺陷的形貌对于疲劳性能的影响要更显著。武亮亮等^[56]发现 800 °C 退火后垂直试样和水平试样的疲劳极限存在较大的各向异性,其分别为 543 MPa 和 439 MPa。通过采用 Murakami 的等效面积法^[57]对缺陷进行处理后,发现水平方向的缺陷尺寸要大于垂直方向,产生了疲劳性能的各向异性。对水平和垂直试样进行 HIP 处理后由于缺陷的减少,各向异性的现象得到了改善,垂直试样和水平试样的疲劳极限分别为 498 MPa 和 447 MPa。

此外,试样的疲劳性能还受表面状况的影响。董登科等^[58]比较了沉积表明和机加工表面状态下 TC4 的疲劳断口,结果表明粗糙的沉积表面由于存在微缺陷会产生较高的应力集中,疲劳源萌生于试样表面;机加工试样表面不仅更光滑,其引入了残余压应力会

表 1 不同增材制造方式制件的疲劳强度 ($R=0.1$)^[47-55]

Table 1 Fatigue strength of parts fabricated by different AM processes ($R=0.1$)^[47-55]

Forming process	Condition	Fatigue strength/ MPa	Ref.
LPBF	As-built	250	[47]
	Annealed	400	[48]
	HIPed	788	[49]
Electron beam melt (EBM)	Annealed	275	[50]
	As-built	475	[51]
	HIPed	600	[52]
Laser wire-feed additive manufacturing (LWAM)	Annealed	700	[53]
Wire-arc additive manufacturing (WAAM)	As-built	400	[54]
		610	
Laser engineering net shaping (LENS)	As-built	300	[55]

使裂纹从内部萌生,进一步提升疲劳性能。易敏等^[59]则采用激光冲击强化 (laser shock peening, LSP) 来进行表面改性。LSP 在大幅降低表面孔隙的同时还能形成纳米晶、形变孪晶等轴晶等组织来改善表面组织

性能,并且和机加工一样能引入残余压应力,共同提高疲劳性能。

沉积态的TC4具有硬而脆的特点,其疲劳强度也小于传统TC4合金,仍需要通过热处理来改善性能。Yu等^[60]测量了沉积态、高温退火和HIP三种条件下LPBF成形TC4的疲劳强度,其中沉积态的疲劳极限低于300 MPa,而HIP处理的试样疲劳极限达到了450~500 MPa,与锻造退火后的TC4相当。其原理为HIP粗化了板条 α 的同时降低了试样的孔隙率,增长了裂纹的扩展路径而且减少了裂纹源。刘剑汶^[45]进一步提高了热处理的温度,发现950℃试样断面的疲劳条带之间的宽度为 $(0.53 \pm 0.21) \mu\text{m}$,小于850℃试样的 $(1.07 \pm 0.21) \mu\text{m}$ 。850℃试样中存在的连续的晶界 α 相在循环加载过程中造成了应力集中,而在950℃时晶界 α 相变得破碎的同时板条 α 相也会发生粗化,两者共同阻碍了裂纹的扩展,从而改善了疲劳性能。Qu等^[14]利用相变与晶界生长不同步的特点开发了纯净

增材制造工艺(net-additive manufacturing process, NAMP),使激光打印TC4试样在消除绝大部分孔隙的同时保留了近似沉积态的组织,其极为细小的 α 相不仅不会成为裂纹源而且还可以有效抑制滑移带与晶粒作用造成的疲劳损害,与沉积态相比疲劳强度提升了106%,达到了978 MPa,且抗拉强度与沉积态相近,约为1230 MPa。目前主流的TC4增材制造工艺为LPBF与EBM,其疲劳性能如图2^[47-53,61-74]所示,可以看出LPBF成形的TC4抗拉强度总体上要大于EBM,其成因可能为EBM的冷却速率低于LPBF,高温下的 β 会向 $(\alpha+\beta)$ 组织转变而非变成马氏体 α' ,因而抗拉强度更低^[75]。在不同后处理工艺下二者的疲劳强度相近但均未超过800 MPa,可能是因为未经HIP处理的LPBF和EBM试样的疲劳性能主要受增材制造过程中形成的孔隙决定,而经过HIP处理后二者的组织均为 $(\alpha+\beta)$ 组织^[52,76],因而总体上疲劳强度差距不大。

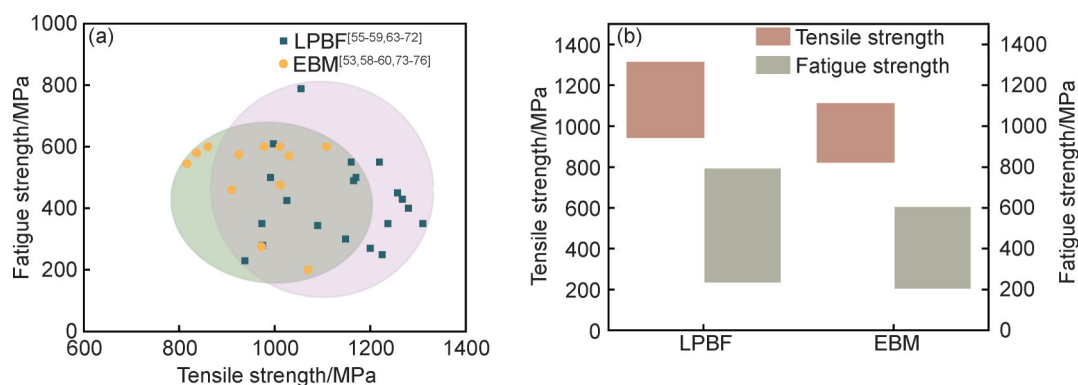


图2 不同工艺下TC4的疲劳性能($R=0.1$)^[47-53,61-74]

(a)分布图;(b)上下限柱状图

Fig.2 Fatigue performances($R=0.1$) of TC4 with different forming processes^[47-53,61-74]

(a)scatter diagram ;(b)histogram with upper and lower limits

目前传统的热处理方式对于LPBF TC4的疲劳强度提升较为有限,在此基础上还会降低其原本的抗拉强度;而进行了NAMP处理后的TC4不仅保留了与沉积态相近的抗拉强度,而且还具有极高的疲劳强度,是一种实用性较强的新型热处理手段。除此之外,诸如LSP等表面加工手段对于疲劳强度的提升也较为明显,成为热处理之外的优秀后处理方式。

4 激光粉末床熔融TC4合金断裂韧度

由于马氏体 α' 的脆性与不稳定性以及对裂纹扩展的抵抗性弱,LPBF成形TC4合金的断裂韧度也低于传统的锻造和铸造TC4合金^[77],常见的增材制造

TC4合金断裂韧度如表2^[76,78-82]所示。与拉伸性能类似,沉积态TC4合金的断裂韧度也表现出了各向异性。Cain等^[83]对沉积态TC4合金不同方向上的断裂韧度进行了研究,如图3所示,断裂韧度的大小为 $XY > XZ > ZX$ (分别为 $(28 \pm 2) \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、 $(23 \pm 1) \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 $(16 \pm 1) \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$),这是 β 柱状晶和残余应力共同作用的结果。若只考虑组织形貌XZ试样中裂纹扩展方向平行于 β 柱状晶,其断裂韧度应小于裂纹扩展方向垂直于 β 柱状晶的ZX试样,但Vrancken等^[84]发现ZX试样断面的周围存在较高的残余拉应力,这使得ZX试样在靠近自由表面的部分(即靠近XOZ面)更容易产生裂纹且裂纹扩展速度更快,从而导致断裂韧度的降低;而XY试样断裂韧度高于XZ试样则是因为

表 2 不同增材制造方式制件的断裂韧性^[76,78-82]Table 2 Fracture toughness of parts fabricated by different forming processes^[76,78-82]

Forming process	Condition	Fracture toughness/ (MPa·m ^{1/2})	Ref.
LPBF	As-built	52.4	[78]
	Annealed	108	[79]
	Solution+aging	106	[80]
	HIPed	137.26(K_{IC})	[76]
EBM	As-built	49.7	[81]
	As-built	56.6	
	β annealed	82.0	
WAAM	As-built	74.3	[82]
	As-built	82.1	

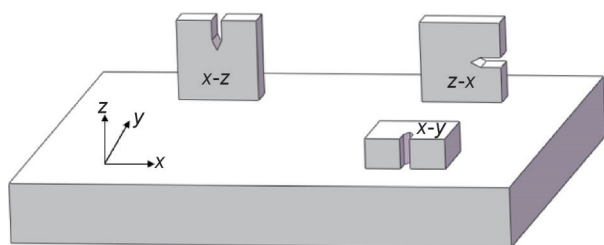


图 3 不同测试方向的 C(T) 试样

Fig.3 C(T) specimens with different test orientations

β 柱状晶在后者方向上的裂纹扩展抗性更强。

热处理是消除 LPBF TC4 合金各向异性和改善断裂韧性性能的有效手段,现阶段研究者主要针对退火和固溶两类工艺进行了一定的探索研究。Leuders 等^[18]对沉积态 TC4 试样进行了 800 °C/2 h 的退火处理后 x 轴和 y 轴方向的平均残余应力分别由 105 MPa 和 225 MPa 下降到 0 MPa 和 2.5 MPa,但当温度继续提高时不会使残余应力进一步降低。Cain 等^[83]在进行 650 °C 的去应力退火后发现 β 柱状晶的结构仍然存在,但热处理改变了晶粒之间接触面的平面性,从而减小了各向异性。李玉海等^[77]在 500 °C 的去应力退火后进行了 700~950 °C 一系列的退火与固溶处理,研究表明随着第二步热处理温度的升高板条 α 相会发生粗化,裂纹扩展路径因而变得更曲折,断裂韧性上升;当温度达到 900 °C 和 950 °C 时粗化的板条 α 相会形成集束使裂纹扩展路径长度增加,同时 β 相比比例上升导致 α/β 相界面数目增加,裂纹易在结合力较弱的相界面处生成二次裂纹,进一步增大了裂纹扩展的能量损耗,从而再次提高了断裂韧性。左柏强^[79]以及 Kumar 等^[80]分别对 LPBF TC4 进行了两相区退火与固溶时效处理,其断裂韧性分别为 108 MPa·m^{1/2} 与 106 MPa·m^{1/2}。Zhang 等^[76]通过 940 °C/125 MPa/1.5 h 的热等静压处

理在粗化组织的同时减小了 TC4 内部缺陷的含量,处理后试样的断裂韧性从沉积态的 (48.43±11.24) MPa·m^{1/2} 提升至 (137.26±6.54) MPa·m^{1/2},达到了沉积态的近三倍。

目前 TC4 断裂韧性的研究多集中于传统工艺,热轧的 TC4 经过两相区固溶时效处理以及 β 固溶时效处理后断裂韧性分别为 61.45 MPa·m^{1/2} 与 95.13 MPa·m^{1/2}^[85],而锻造成形的 TC4 进行上述两种热处理后其断裂韧性分别可达 75.8 MPa·m^{1/2} 与 109 MPa·m^{1/2}^[86],这与 LPBF 成形的 TC4 相近。关于其他增材制造方式,童邵辉等^[87]对 EBM 成形 TC4 的断裂韧性进行了研究,在将基板预热到 700 °C 后其制件根据打印方向不同断裂韧性在 85.33~101.45 MPa·m^{1/2} 之间,与热处理后的 LPBF 制件接近,但 EBM 的真空环境以及 700 °C 的基板预热温度对设备要求较高;薛蕾等^[88]测量了激光立体成形 (laser solid forming, LSF) TC4 的断裂韧性,其范围在 52.6~62.7 MPa·m^{1/2},高于沉积态 LPBF 试样,但 LSF 精度低于 LPBF;与其类似的还有 WAAM 技术,Zhang 等^[82]通过振荡沉积策略使得沉积态的 WAAM 制件断裂韧性最高可达 82.1 MPa·m^{1/2},但 WAAM 相比 LPBF 也存在精度不足的问题。

对于 LPBF 工艺,由于 HIP 在进行热处理的同时能减少试样中的缺陷,对断裂韧性这类动态力学性能提升较大,是目前提升 LPBF TC4 断裂韧性的最佳方案。但实际使用时还要考虑零件所要求的损伤容限性能,在满足损伤容限的情况下,采用工艺更为简单的退火或固溶时效处理也是可以的。

5 结束语

随着激光粉末床熔融 TC4 制件在航空领域中的应用日渐广泛,其动态力学性能的重要性愈发突出。激光粉末床熔融成形的 TC4 合金具有良好的抗拉强度,但其疲劳性能和断裂韧性较差,通常需要经过后续的热处理来提升其疲劳强度和断裂韧性。然而常见的高温退火、固溶时效以及热等静压等手段在提高疲劳强度与断裂韧性的同时均会伴随不同程度的抗拉强度下降,如何减少抗拉强度降低的程度将会成为未来研究的一个方向。

因此本文总结了激光粉末床熔融成形 TC4 合金的特点与相应的处理方法,并对其拉伸性能、疲劳性能和断裂韧性进行了具体分析。为获得更高的力学性能可以从以下两点入手:(1)NAMP 多步热处理方案由于保留了激光粉末床熔融 TC4 特有的针状结构,在大幅提升疲劳强度的同时只牺牲了一小部分抗拉

强度,该热处理方案对于断裂韧度的影响可进行进一步的研究;(2)激光冲击强化等手段表明材料的表面状况对其力学性能有一定影响,在热处理后进行表面加工可以进一步提升其力学性能。对这些方面展开研究能有效拓宽激光粉末床熔融成形 TC4 合金的应用场景,为各行各业,尤其是航空航天行业提供有力的技术保障。

参考文献

- [1] Uhlmann E, Kersting R, Klein T B, et al. Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 35: 55-60.
- [2] 孙靖, 李鹏, 朱小刚, 等. 激光选区熔化制备 TC4 钛合金的组织演变[J]. *应用激光*, 2018, 38(6): 908-914.
Sun J, Li P, Zhu X G, et al. Microstructure evolution of TC4 titanium alloy prepared by selective laser melting[J]. *Applied Laser*, 2018, 38(6): 908-914.
- [3] 谷雪忠. 3D 打印 TC4 合金的组织与缺口高周疲劳性能[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
Gu X Z. Microstructure and Notch high-cycle fatigue properties of 3D printed TC4 alloy[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [4] Xu W, Brandt M, Sun S, et al. Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via *in situ* martensite decomposition[J]. *Acta Materialia*, 2015, 85: 74-84.
- [5] 马尧. SLM 成形 TC4 钛合金不同高度处微观组织演变[J]. *应用激光*, 2020, 40(5): 790-794.
Ma Y. The microstructure transformation of selective laser melting processed TC4 at different heights[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(5): 790-794.
- [6] Hojjatzadeh S M H, Parab N D, Guo Q L, et al. Direct observation of pore formation mechanisms during LPBF additive manufacturing process and high energy density laser welding[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 153: 103555.
- [7] Zhou B, Zhou J, Li H X, et al. A study of the microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by SLM under vacuum[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 724: 1-10.
- [8] 张升, 桂睿智, 魏青松, 等. 选择性激光熔化成形 TC4 钛合金开裂行为及其机理研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(23): 21-27.
Zhang S, Gui R Z, Wei Q S, et al. Cracking behavior and formation mechanism of TC4 alloy formed by selective laser melting[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23): 21-27.
- [9] Zhu M L, Xuan F Z. Fatigue crack initiation potential from defects in terms of local stress analysis[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(3): 496-503.
- [10] 蔡伟军. 18Ni-300 粉末激光选区熔化成型工艺及成型件性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
Cai W J. Research on process and property of 18Ni-300 alloy manufactured by selective laser melting[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [11] 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.
- [12] 段伟. TC4 合金 SLM 成形过程温度场数值模拟及缺陷、组织与力学性能的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
Duan W. Temperature field simulation, defect, microstructure and mechanical property of TC4 alloy by selective laser melting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [13] 吕周晋, 李好峰, 车立达, 等. HIP 温度对 SLM 制备 TC4 钛合金组织和力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2022, 47(6): 138-142.
Lü Z J, Li H F, Che L D, et al. Effect of HIP temperature on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy prepared by SLM[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2022, 47(6): 138-142.
- [14] Qu Z, Zhang Z J, Liu R, et al. High fatigue resistance in a titanium alloy via near-void-free 3D printing[J]. *Nature*, 2024, 626(8001): 999-1004.
- [15] HUASHAN Y, YUSHENG S, WENXIAN Z, et al. Numerical simulation of the temperature field in selective laser melting[J]. *Applied Laser*, 2007, 27(6): 456-460.
- [16] Roberts I. Investigation of residual stresses in the laser melting of metal powders in additive layer manufacturing[D]. Wolverhampton: University of Wolverhampton, 2012.
- [17] Ali H, Ma L, Ghadbeigi H, 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, 695: 211-220.
- [18] 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.
- [19] 张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光立体成形 TC4 残余应力的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(5): 774-778.
Zhang S Y, Lin X, Chen J, et al. Influence of heat treatment on residual stress of Ti-6Al-4V alloy by laser solid forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(5): 774-778.
- [20] Levkulich N C, Semiatin S L, Gockel J E, et al. The effect of process parameters on residual stress evolution and distortion in the laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 28: 475-484.
- [21] Vrancken B. Study of residual stresses in selective laser melting[D]. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2016.
- [22] 杜畅, 张津, 连勇, 等. 激光增材制造残余应力研究现状[J]. *表面技术*, 2019, 48(1): 200-207.
Du C, Zhang J, Lian Y, et al. Research progress on residual stress in laser additive manufacturing[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(1): 200-207.
- [23] 梁晓康, 陈济轮, 严振宇, 等. 激光选区熔化成形 TC4 钛合金表面粘粉及残余应力研究[J]. *电加工与模具*, 2016(5): 52-55.
Liang X K, Chen J L, Yan Z Y, et al. Study on surface adhesion and residual stress of TC4 titanium alloy by selective laser melting

- [J].Electromachining & Mould, 2016(5):52-55.
- [24] Anderson L S, Venter A M, Vrancken B, et al. Investigating the residual stress distribution in selective laser melting produced Ti-6Al-4V using neutron diffraction [C] // Materials Research Proceedings, 2018, 4: 73-78.
- [25] 孙新发. 3D打印钛合金器件中残余应力演变规律与调控机理[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- Sun X F. Evolution and regulation mechanism of residual stress in 3D printed titanium alloy parts [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [26] Galarraga H, Warren R J, Lados D A, et al. Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM) [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 685: 417-428.
- [27] 吴慧敏, 罗志强, 金胜然. 激光功率和扫描速度对选区激光熔化成形TC4钛合金组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2021, 45(9): 51-57.
- Wu H M, Luo Z Q, Jin S R. Effects of laser power and laser scanning speed on microstructure and property of TC4 titanium alloy formed by selective laser melting [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(9): 51-57.
- [28] 雷蕾. 选区激光熔化成形Ti6Al4V合金及其复合材料的组织和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- Lei L. Microstructure and properties of Ti6Al4V alloy and its composites formed by selective laser melting [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [29] 焦泽辉, 于慧臣, 吴学仁, 等. 激光选区熔化TC4钛合金的室温及高温拉伸各向异性与断裂机制研究[J]. 材料导报, 2023, 37(增刊2): 431-436.
- Jiao Z H, Yu H C, Wu X R, et al. Study on tensile anisotropy and fracture mechanism at room and elevated temperature of the selective laser melted TC4 titanium alloy [J]. Materials Reports, 2023, 37(S2): 431-436.
- [30] Liu Z, Zhao Z B, Liu J R, et al. Effect of α texture on the tensile deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy produced via electron beam rapid manufacturing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 742: 508-516.
- [31] 窦振, 王豫跃, 张安峰, 等. 不同热处理对SLM TC4组织性能及各向异性的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 0802009.
- Dou Z, Wang Y Y, Zhang A F, et al. Effect of different heat treatments on microstructure, properties, and anisotropy of SLM TC4 [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 0802009.
- [32] 崔丽, 武德凡, 杨泽卿, 等. 热处理对SLM成形TC4合金组织及性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2023, 49(9): 970-979.
- Cui L, Wu D F, Yang Z Q, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of TC4 alloys fabricated by selective laser melting [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2023, 49(9): 970-979.
- [33] 黄正阳, 郭子静, 文光平, 等. 不同工艺退火后TC4合金的力学性能[J]. 金属热处理, 2015, 40(9): 175-178.
- Huang Z Y, Guo Z J, Wen G P, et al. Mechanical properties of TC4 alloy annealed with different processes [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(9): 175-178.
- [34] 孙兵兵, 闫泰起, 陈冰清, 等. 选区激光熔化TC4钛合金组织性能调控热处理工艺[J]. 焊接技术, 2023, 52(6): 1-6.
- Sun B B, Yan T Q, Chen B Q, et al. Heat treatment process for optimization of the microstructure and mechanical properties of selective laser melting TC4 titanium alloy [J]. Welding Technology, 2023, 52(6): 1-6.
- [35] 高星, 张宁, 丁燕, 等. 热处理时间对激光选区成形TC4钛合金组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(9): 12-17.
- Gao X, Zhang N, Ding Y, et al. Effect of heat treatment time on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy fabricated by selective laser melting [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(9): 12-17.
- [36] 李伟. SLM增材制造TC4合金微观组织与力学性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2021.
- Li W. A study on the microstructure and mechanical properties of TC4 alloy produced by SLM additive manufacturing [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021.
- [37] 白红杰. 激光选区熔化TC4和TC18钛合金的成形工艺与组织性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
- Bai H J. Manufacturing process and structural performance of TC4 and TC18 titanium alloy fabricated by the selective laser melting (SLM) [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022.
- [38] 巩建强, 杜文强, 张璐, 等. 经SLM打印成型的TC4合金热处理研究[J]. 应用激光, 2020, 40(3): 404-408.
- Gong J Q, Du W Q, Zhang L, et al. Study on heat treatment of TC4 alloy formed by SLM printing [J]. Applied Laser, 2020, 40(3): 404-408.
- [39] 叶坤. 后处理工艺对选区激光熔化TC4钛合金组织与性能的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- Ye K. Influence of post-treatment process on the microstructure and properties of selective laser melted TC4 titanium alloy [D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [40] 蔡雨升, 吉海宾, 雷家峰, 等. 热处理对激光选区熔化TC4钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2020, 37(1): 9-16.
- Cai Y S, Ji H B, Lei J F, et al. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy fabricated by selective laser melting [J]. Titanium Industry Progress, 2020, 37(1): 9-16.
- [41] 李敬, 刘敏, 马文有, 等. 工艺参数及热处理对选区激光熔化Ti6Al4V性能的影响研究[J]. 应用激光, 2017, 37(6): 779.
- Li J, Liu M, Ma W Y, et al. Effects of process parameters and post-heat treatment on the properties of selective laser melted Ti6Al4V [J]. Applied Laser, 2017, 37(6): 779.
- [42] 朱加雷, 王凯, 马桂殿, 等. TC4钛合金激光选区熔化成形性能研究[J]. 应用激光, 2017, 37(6): 793.
- Zhu J L, Wang K, Ma G D, et al. Study on TC4 titanium alloy selective laser melting forming mechanical properties [J]. Applied Laser, 2017, 37(6): 793.
- [43] 肖振楠, 刘婷婷, 廖文和, 等. 激光选区熔化成形TC4钛合金热处理后微观组织和力学性能[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 902001.
- Xiao Z N, Liu T T, Liao W H, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy formed by selective laser

- melting after heat treatment[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9):902001.
- [44] 李文贤, 易丹青, 刘会群, 等. 热处理制度对选择性激光熔化成形 TC4 钛合金的组织与力学性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2017, 22(1):70-78.
- Li W X, Yi D Q, Liu H Q, et al. Effect of the heat treatment process on microstructure and mechanical properties of the TC4 alloy processed by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2017, 22(1):70-78.
- [45] 刘剑汶. 热处理对 SLM 成形 Ti6Al4V 晶界 α 相的演变及力学性能的影响[D]. 上海: 上海理工大学, 2022.
- Liu J W. Effect of heat treatment on evolution of grain boundary α -phase and mechanical properties in SLM processed Ti6Al4V [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science & Technology, 2022.
- [46] 李颖, 彭霜, 张婷, 等. 选区激光熔化制备 Ti-6Al-4V 合金的热处理工艺及力学性能[J]. 金属热处理, 2022, 47(9):175-181.
- Li Y, Peng S, Zhang T, et al. Heat treatment process and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(9):175-181.
- [47] Jiang Q H, Li S, Zhou C, et al. Effects of laser shock peening on the ultra-high cycle fatigue performance of additively manufactured Ti6Al4V alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144: 107391.
- [48] Xu W, Sun S, Elambasseril J, et al. Ti-6Al-4V additively manufactured by selective laser melting with superior mechanical properties[J]. Jom, 2015, 67(3):668-673.
- [49] Alegre J M, Diaz A, García R, et al. Effect of HIP post-processing at 850 °C/200 MPa in the fatigue behavior of Ti-6Al-4V alloy fabricated by Selective Laser Melting[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 163:107097.
- [50] Greitemeier D, Palm F, Syassen F, et al. Fatigue performance of additive manufactured TiAl6V4 using electron and laser beam melting[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 94:211-217.
- [51] Gong H J, Rafi K, Gu H F, et al. Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting[J]. Materials & Design, 2015, 86:545-554.
- [52] Mohammadhosseini A, Fraser D, Masood S H, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V manufactured by electron beam melting process [J]. Materials Research Innovations, 2013, 17(S2):106-112.
- [53] Brandl E, Leyens C, Palm F. Mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V using wire and powder based processes [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2011, 26(1):01200410pp.
- [54] Biswal R, Zhang X, Syed A K, et al. Criticality of porosity defects on the fatigue performance of wire+arc additive manufactured titanium alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 122: 208-217.
- [55] Sterling A J, Torries B, Shamsaei N, et al. Fatigue behavior and failure mechanisms of direct laser deposited Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 655:100-112.
- [56] 武亮亮, 许瑞达, 焦泽辉, 等. 激光选区熔化 TC4 合金的高周疲劳行为[J]. 材料工程, 2024, 52(3):61-70.
- Wu L L, Xu R D, Jiao Z H, et al. High cycle fatigue behavior of selective laser melting TC4 alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(3):61-70.
- [57] Murakami Y, Usuki H. Quantitative evaluation of effects of non-metallic inclusions on fatigue strength of high strength steels. II : fatigue limit evaluation based on statistics for extreme values of inclusion size [J]. International Journal of Fatigue, 1989, 11 (5) : 299-307.
- [58] 董登科, 陈安, 李小飞, 等. 表面粗糙度对激光选区熔化 TC4 钛合金疲劳性能的影响[J]. 机械强度, 2020, 42(5):1094-1098.
- Dong D K, Chen A, Li X F, et al. Effect of surface roughness on fatigue property of TC4 titanium alloy by selective laser melting [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(5):1094-1098.
- [59] 易敏, 张璇, 胡文轩, 等. 激光冲击强化改善增材制造金属疲劳性能[J]. 航空制造技术, 2023, 66(20):38-49.
- Yi M, Zhang X, Hu W X, et al. Laser shock peening for improving fatigue property of additively manufactured metals [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(20):38-49.
- [60] Yu H C, Li F Z, Wang Z M, et al. Fatigue performances of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy: influence of surface finishing, hot isostatic pressing and heat treatments [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 120:175-183.
- [61] Gerov M V, Vladislavskaya E Y, Terent'ev V F, et al. Fatigue strength of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting [J]. Russian Metallurgy (Metally), 2016, 2016(10):935-941.
- [62] Rafi H K, Starr T L, Stucker B E. A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti-6Al-4V and 15-5 pHStainless steel parts made by selective laser melting [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(5/6/7/8):1299-1309.
- [63] Wycisk E, Emmelmann C, Siddique S, et al. High cycle fatigue (HCF) performance of Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting [J]. Advanced Materials Research, 2013, 816/817: 134-139.
- [64] Rekedal K, Liu D. Fatigue life of selective laser melted and hot isostatically pressed Ti-6Al-4V absent of surface machining [C] // 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Kissimmee: AIAA, 2015: AIAA2015-0894.
- [65] Zhao X L, Li S J, Zhang M, et al. Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting [J]. Materials & Design, 2016, 95:21-31.
- [66] Benedetti M, Fontanari V, Bandini M, et al. Low- and high-cycle fatigue resistance of Ti-6Al-4V ELI additively manufactured via selective laser melting: mean stress and defect sensitivity [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 107:96-109.
- [67] Hu Y N, Wu S C, Withers P J, et al. The effect of manufacturing defects on the fatigue life of selective laser melted Ti-6Al-4V structures [J]. Materials & Design, 2020, 192:108708.
- [68] Kasperovich G, Hausmann J. Improvement of fatigue resistance

- and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 220: 202-214.
- [69] Le V D, Pessard E, Morel F, et al. Fatigue behaviour of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy: the role of defects on scatter and statistical size effect [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 140: 105811.
- [70] Aguado-Montero S, Navarro C, Vázquez J, et al. Fatigue behaviour of PBF additive manufactured Ti6Al4V alloy after shot and laser peening [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 154: 106536.
- [71] Kahlin M, Ansell H, Basu D, et al. Improved fatigue strength of additively manufactured Ti6Al4V by surface post processing [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 134: 105497.
- [72] Hrahe N, Gnäupel-Herold T, Quinn T. Fatigue properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated via electron beam melting (EBM): effects of internal defects and residual stress [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 94: 202-210.
- [73] Shui X L, Yamanaka K, Mori M, et al. Effects of post-processing on cyclic fatigue response of a titanium alloy additively manufactured by electron beam melting [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 680: 239-248.
- [74] Suo H B, Chen Z Y, Liu J R, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V by electron beam rapid manufacturing [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(4): 780-785.
- [75] Bertsch K M, Voisin T, Forien J B, et al. Critical differences between electron beam melted and selective laser melted Ti-6Al-4V [J]. Materials & Design, 2022, 216: 110533.
- [76] Zhang H Y, Dong D K, Su S P, et al. Experimental study of effect of post processing on fracture toughness and fatigue crack growth performance of selective laser melting Ti-6Al-4V [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(10): 2383-2393.
- [77] 李玉海, 左柏强, 蔡雨升, 等. 低高温双重热处理对激光选区熔化 TC4 钛合金断裂韧性影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(5): 1864-1872.
- Li Y H, Zuo B Q, Cai Y S, et al. Effect of low and high double heat treatment on fracture toughness of TC4 titanium alloy fabricated by selective laser melting [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(5): 1864-1872.
- [78] Van Hooreweder B, Moens D, Boonen R, et al. Analysis of fracture toughness and crack propagation of Ti6Al4V produced by selective laser melting [J]. Advanced Engineering Materials, 2012, 14(1/2): 92-97.
- [79] 左柏强. 热处理对 3D 打印 TC4 钛合金断裂韧性的影响 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021.
- Zuo B Q. Effect of heat treatment on fracture toughness of 3D printed TC4 titanium alloy [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2021.
- [80] Kumar P, Ramamurty U. 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.
- [81] Galarraga H, Warren R J, Lados D A, et al. Fatigue crack growth mechanisms at the microstructure scale in as-fabricated and heat treated Ti-6Al-4V ELI manufactured by electron beam melting (EBM) [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 176: 263-280.
- [82] Zhang X, Martina F, Ding J, et al. Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2017, 40(5): 790-803.
- [83] Cain V, Thijs L, Van Humbeeck J, et al. Crack propagation and fracture toughness of Ti6Al4V alloy produced by selective laser melting [J]. Additive Manufacturing, 2015, 5: 68-76.
- [84] Vrancken B, Cain V, Knutsen R, et al. Residual stress via the contour method in compact tension specimens produced via selective laser melting [J]. Scripta Materialia, 2014, 87: 29-32.
- [85] 吴帮炜. 显微组织对 TC4 钛合金断裂韧性与疲劳裂纹扩展速率的影响 [D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- Wu B W. Effect of microstructure on fracture toughness and fatigue crack growth rate of TC4 titanium alloy [D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.
- [86] 郭萍, 赵永庆, 洪权, 等. 损伤容限型 TC4-DT 钛合金性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(11): 2367-2370.
- Guo P, Zhao Y Q, Hong Q, et al. Properties of damage tolerance TC4-DT titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(11): 2367-2370.
- [87] 童邵辉, 李东, 邓增辉, 等. 电子束快速成形 TC4 合金的组织与断裂性能 [J]. 材料工程, 2019, 47(1): 125-130.
- Tong S H, Li D, Deng Z H, et al. Microstructure and fracture property of electron beam rapidly manufactured TC4 alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(1): 125-130.
- [88] 薛蕾, 陈静, 虞文军, 等. Ti-6Al-4V 合金激光立体成形沉积态的平面应变断裂韧性 [J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3210-3214.
- Xue L, Chen J, Yu W J, et al. Investigation on K_{IC} of as-deposited Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser solid forming [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3210-3214.

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4601002); 上海市青年科技启明星计划资助(22QB1401300)

收稿日期: 2024-05-14; 录用日期: 2024-07-12

通讯作者: 张亮(1985—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为金属增材制造, 联系地址: 上海市虹口区邯郸路 99 号上海材料研究所(200437), E-mail: zhangliang@srim.com.cn

(本文责编: 齐书涵)