

构建方向对增材制造 TC4 钛合金力学性能及疲劳行为的影响

王雨鑫, 马天昊, 杨桥发, 周昌玉*

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 基于激光粉末床熔融(L-PBF)制备的 TC4 钛合金试样, 系统开展了 0°、12°和 16°三种构建方向下的室温拉伸与单轴疲劳试验。拉伸试验结果表明: 沿 16°方向构建的 L-PBF TC4 钛合金在高应变速率下表现出最佳的塑性, 小范围内变化的构建角度会显著影响 L-PBF TC4 钛合金的力学性能。通过提出修正后 Hollomon 模型, 整合了不同构建方向及应变速率对拉伸行为的影响, 且整体预测性能优于 Johnson-Cook(JC)模型, 准确地描述了 L-PBF TC4 钛合金的拉伸力学行为。疲劳试验结果表明: 在较高应变幅(0.8%, 1.0%)作用下, 试样在循环初期出现了短暂的初始硬化, 随后表现为典型的软化特征。而在较低应变幅(0.4%, 0.6%)作用下, 试样的初始硬化阶段消失, 直接进入循环稳定阶段, 直至快速断裂。最后建立了基于混合物理与数据驱动的 VAE-ANN 模型, 得到的疲劳寿命预测结果均位于 2 倍误差带内, 准确地预测了不同构建方向下 L-PBF TC4 钛合金的疲劳寿命。

关键词: TC4 钛合金; 激光粉末床熔融; 拉伸力学性能; 单轴疲劳; 寿命预测

中图分类号: TG146, TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)02-0097-10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.02.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Effects of build direction on mechanical properties and fatigue behavior of additively manufactured TC4 titanium alloy

WANG Yuxin, MA Tianhao, YANG Qiaofa, ZHOU Changyu*

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract: This paper systematically investigates the tensile and uniaxial fatigue behaviors of TC4 titanium alloy, by laser powder bed fusion (L-PBF), with three building directions (0°, 12°, 16°) under room temperature. Tensile test results indicate that specimens built along 16° direction exhibit the best ductility at high strain rates. Small building direction variations significantly influence the mechanical properties of L-PBF TC4. A modified Hollomon model is proposed, to effectively integrate the effects of different building directions and strain rates on tensile behavior. This model demonstrates superior predictive capability compared to the Johnson-Cook (JC) model, accurately characterizing the tensile mechanical response of L-PBF TC4. Fatigue test results reveal that under higher applied strain amplitudes (0.8%, 1.0%), the specimens experience transient initial cyclic hardening followed by typical softening characteristics. In contrast, under lower applied strain amplitudes (0.4%, 0.6%), the initial hardening stage is absent, and the specimens directly enter a stable cyclic stage before rapid failure. Finally, a hybrid physics and data-driven VAE-ANN model is developed. All fatigue life predictions fall within

收稿日期: 2025-10-13; 修回日期: 2025-11-26; 接受日期: 2025-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(51975271)。

作者简介: 王雨鑫, 2001 年出生, 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为增材制造材料强度研究, E-mail: 19852037867@163.com; *通信作者: 周昌玉, 1963 年出生, 男, 安徽马鞍山人, 教授, 博士生导师, 主要从事承压结构完整性研究, E-mail: changyu_zhou@163.com。

the 2 times error band, accurately predicting the fatigue life of L-PBF TC4 under different building directions.

Key words: TC4 titanium alloy; laser powder bed fusion; tensile mechanical properties; uniaxial fatigue; life prediction

0 引言

TC4(Ti6Al4V)钛合金具有密度低、比强度高、抗腐蚀性好和力学性能优良等优点,广泛运用于化工设备、航空航天、生物医学和电子元件等领域^[1]。通过传统制造方法(轧制、铸造、锻造)生产复杂结构的TC4钛合金构件时,表现出材料利用率低和加工成本高等问题^[2]。

增材制造是一种基于三维数字模型,采用材料逐层累加的方式直接生产构件的制造方法。与传统制造工艺相比,增材制造技术可更经济、高效地直接成型具有复杂几何结构的金属构件。在各类增材制造技术路线中,激光粉末床熔融(L-PBF)技术以金属粉末为原料,通过逐层扫描熔融方式直接成形零件。其制备的TC4钛合金具有较高的成形精度和优良的表面质量^[3]。

近年来,已有一些有关增材制造钛合金构建方向和力学性能的研究。多项研究^[4-6]指出,在L-PBF TC4钛合金中,相较于沿0°和45°构建的试样,沿90°构建方向制造的试样中导致失效的缺陷尺寸更大、分布更为分散。PAUL^[7]等通过L-PBF在垂直、水平和对角方向上制备不同缺口取向的试样,发现垂直方向试样内部含有较多体积缺陷,且裂纹扩展速率较快。

PERSENOT等^[6-8]通过沿垂直和水平方向制备试样的单轴疲劳试验,发现水平方向构建的试样具有更优异的疲劳性能和更长的疲劳寿命。ZHANG等^[9]则对0°、45°和90°构建方向下制备的L-PBF TC4试样开展疲劳试验,发现疲劳裂纹均萌生于内部气孔或未熔合缺陷处,且缺陷尺寸随着构建角度增加而逐渐增大,疲劳寿命随着构建角度增加而逐渐降低。

现阶段,针对增材制造TC4钛合金的力学性能及疲劳行为研究多集中于固定的0°、45°和90°构建方向,而对不同的较小角度构建条件下L-PBF成形TC4钛合金的相关研究仍相对有限。L-PBF技术能灵活构建任意角度的TC4试样,基于工业纯钛临界平面理论的相关研究^[10-11],选取0°、12°、16°三种构建方向制备L-PBF TC4试样。通过开展室温下准静态拉伸试验获取试样的拉伸力学性能数据,并结合Johnson-Cook(JC)模型、Hollomon模型以及修

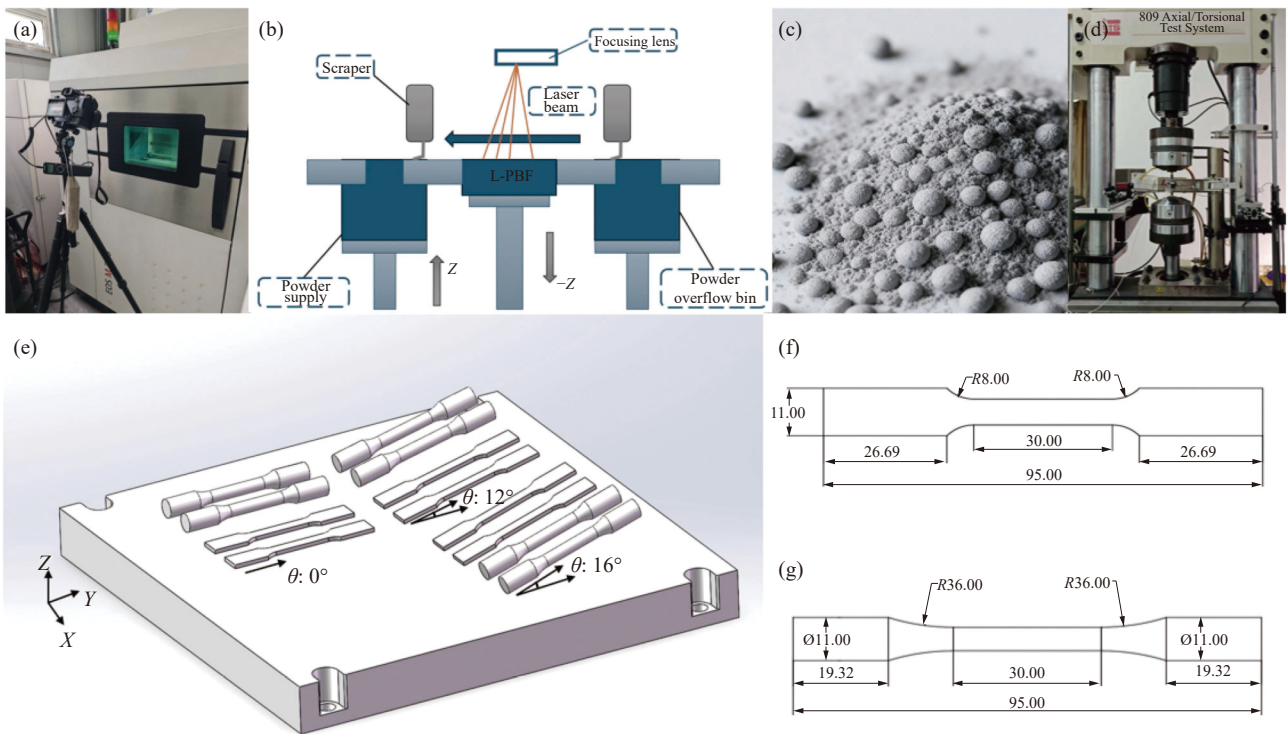
正Hollomon模型模拟真实应力。进一步地,对上述不同构建方向试样进行单轴疲劳试验,分析其疲劳性能,建立混合数据与物理驱动模型以预测疲劳寿命。

1 试验材料及方法

试验采用符合ASTM F1472和ASTM F2924标准^[12-13]的TC4粉末,其粉末粒径分布为63 μm。拉伸与单轴疲劳试样均采用EOS M290 L-PBF设备制备成型,如图1(a)~(c)所示。考虑到临界平面理论在轧制工业纯钛疲劳分析研究中的成功应用与广泛认可^[10-11],结合L-PBF技术在试样任意构建方向上所具有的灵活性,基于临界平面理论确定L-PBF TC4试样的构建方向。临界平面理论通常基于最大主应变平面或最大剪应变平面^[14],轧制工业纯钛在不同疲劳载荷加载后的断面倾角为12.04°与16.88°^[11],与理论最大主应变平面较吻合。因此最终选定0°、12°和16°三种构建角度,其中0°构建角度为对比项。系统开展拉伸和单轴低周疲劳测试,以揭示基于临界平面不同构建方向下材料的力学性能和疲劳行为。

拉伸试样和单轴疲劳试样均分别沿0°、12°和16°三种构建角度进行制备,如图1(e)所示。所有试样均采用线切割方法从成型基板上完整分离,并进行研磨和抛光处理,以满足表面粗糙度要求。拉伸试样和单轴疲劳试样的尺寸分别如图1(f)(g)所示。

如图1(d)所示,在MTS 809拉扭试验机上进行拉伸与疲劳试验,并采用引伸计实时记录与控制应变变化。为系统研究构建方向及应变速率对材料力学性能的影响,基于GB/T 228.1-2021《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》^[15],针对拉伸试样的三个构建方向(0°、12°、16°),分别在两种不同应变速率下进行拉伸试验,应变速率分别为 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。针对单轴疲劳试样的三个构建方向(0°、12°、16°),分别在不同加载应变幅值下进行疲劳试验,加载应变幅值分别为0.4%、0.6%、0.8%、1.0%。疲劳寿命定义为响应应力幅值下降至峰值应力50%时所对应的循环次数。拉伸和单轴疲劳试验方案如表1、2所示。



(a)EOS M290 L-PBF 设备;(b)L-PBF 工艺流程;(c)TC4 粉末;(d)MTS 809 试验机;(e)构建方向示意;(f)拉伸试样尺寸;(g)单轴试样尺寸

图 1 试样制备与试验(单位:mm)

Fig. 1 Specimen preparation and testing

表 1 拉伸试验方案
Table 1 Tensile test programs

Specimen No.	Building direction/(°)	Strain rate/s ⁻¹
T1	0	5×10 ⁻⁵
T3	12	5×10 ⁻⁵
T5	16	5×10 ⁻⁵
T2	0	5×10 ⁻³
T4	12	5×10 ⁻³
T6	16	5×10 ⁻³

2 不同构建方向对 L-PBF TC4 钛合金拉伸行为的影响

2.1 构建方向对力学性能的影响

图 2(a)(b)显示了 5×10⁻⁵/s 和 5×10⁻³/s 应变速率下 L-PBF TC4 钛合金的工程应力-应变曲线,不同构建方向下 L-PBF TC4 钛合金表现出较强的应变速率敏感性。在较高应变速率下,材料的屈服强度与抗拉强度普遍更高;除 0°构建方向外,其余角度试样的断后延伸率随应变速率上升而增大。材料曲线从弹性阶段至塑性阶段呈连续过渡,未出现明显的屈服平台,表现出显著的应变硬化特征。

根据图 2 表中各性能指标随应变速率变化的趋势,T1 和 T2 试样(0°构建方向)断后延伸率随应变速率升高而显著降低,而抗拉强度未发生明显变化,表明 0°构建方向材料在低应变速率下具有最优的

塑性。T5 试样至 T6 试样的抗拉强度和断后延伸率均显著升高,尤其在高应变速率下断后延伸率显著高于其它试样,表明 16°构建方向试样在高应变速率下表现出最佳的塑性。

表 2 单轴疲劳应变控制试验方案
Table 2 Strain-controlled uniaxial fatigue test programs

Specimen No.	Building direction/(°)	Strain amplitude/%	N _f /Cycle
A1	0	0.4	11 421
A2	0	0.6	2 801
A3	0	0.8	2 069
A4	0	1.0	910
A5	12	0.4	8 794
A6	12	0.6	3 933
A7	12	0.8	1 546
A8	12	1.0	909
A9	16	0.4	9 975
A10	16	0.6	4 077
A11	16	0.8	2 140
A12	16	1.0	940

T1 和 T2 试样的屈服强度及前半段的应力-应变曲线始终高于其它试样,说明 0°方向构建的 TC4 钛合金具有较高的强度。相比之下,T3~T6 试样(12°和 16°方向)对屈服强度和应力-应变曲线趋势影响较小,但在不同应变速率下的断后延伸率均显著提高,表现出明显的强化。更高的断后延伸率通常意味着材料具有更好的塑性和疲劳性能。相较

于 12°方向,沿 16°方向构建的试样在强度指标相当的情况下表现出更优异的塑性性能。而与 0°方向相比,沿 16°方向构建的试样在较低应变速率下强度指标稍弱而塑性指标较为接近,在较高应变速率

下则表现出明显优越的塑性。结果表明,小范围内变化的构建角度会显著影响 L-PBF TC4 钛合金的力学性能,合理选择构建方向可以显著提升材料的塑性性能。

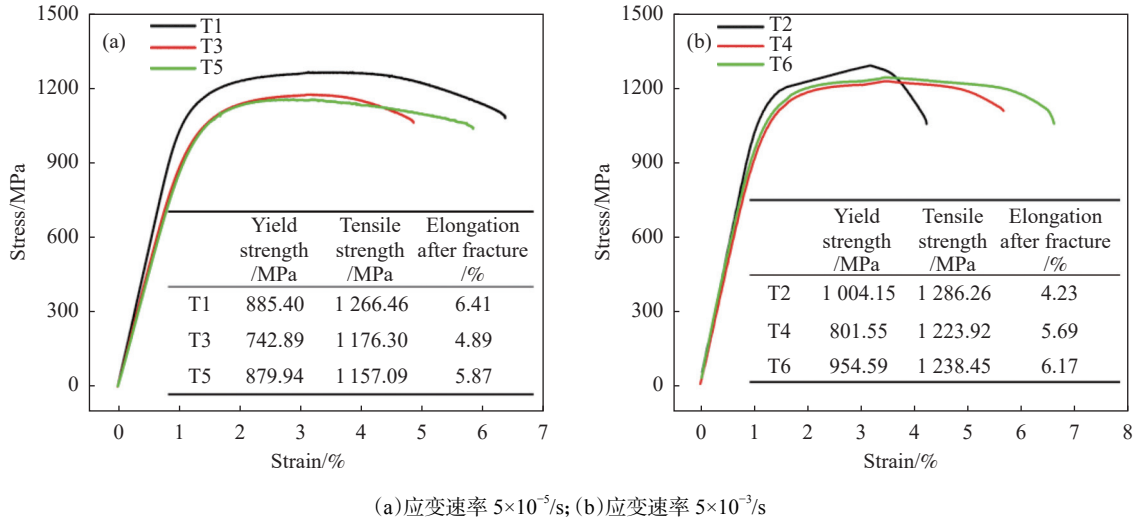


图 2 L-PBF TC4 钛合金的工程应力-应变曲线
Fig. 2 Engineering stress-strain curves of L-PBF TC4 titanium alloy

2.2 不同构建方向下的拉伸本构模型

工程应力-应变曲线基于试样的原始截面积和标距长度计算,无法反映真实瞬时应变。为深入探究 L-PBF TC4 钛合金的力学性能,首先需将工程应力-应变曲线转换为真实应力-应变曲线。由塑性不可压缩条件,在体积不变的情况下,工程应力-应变与真实应力-应变的关系^[16]如式(1)(2)所示。

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e) \quad (1)$$

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \epsilon_e) \quad (2)$$

真实塑性应变表示为式(3)。

$$\epsilon_{tp} = \epsilon_t - \frac{\sigma_t}{E} \quad (3)$$

其中, ϵ_e 为工程应变; ϵ_t 为真实应变; σ_e 为工程应力, MPa; σ_t 为真实应力, MPa; ϵ_{tp} 为真实塑性应变; E 为弹性模量。

通过 MTS-809 拉扭试验机进行数据采集,并经后续处理得到材料的工程应力和工程应变曲线。在拉伸过程中,试样达到工程应力-应变曲线颈缩点时会发生塑性失稳现象,变形开始集中于颈缩区域,整体变形不再均匀。因此,在颈缩发生之后,不再进行工程应力与真实应力之间的转换。

如图 3 所示,选取颈缩前的工程应力-应变曲线,依据式(1)(2)换算为真实应力-应变曲线。再进一步处理真实应力-应变曲线时,运用式(3)扣除弹性段,得到真应力-真塑性应变曲线,并以此建立拉伸本构方程,该过程在图 3 的局部放大图中予以展示。

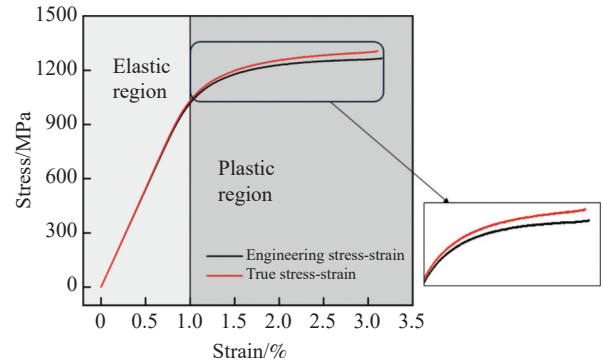


图 3 工程应力-应变和真实应力-应变曲线
Fig. 3 Engineering and true stress-strain curves

Johnson 和 Cook 于 20 世纪 80 年代提出的 Johnson-Cook(JC)本构模型^[17],已被广泛用于描述金属材料的动态变形行为。JC 模型由公式(4)中的应变强化、应变速率和温度软化三部分组成。

$$\sigma = (A + B\epsilon^{n_c}) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) (1 - T^{*m}) \quad (4)$$

式(4)中 σ 为流动应力, MPa; ϵ 为塑性应变; $\dot{\epsilon}$ 为塑性应变率, s^{-1} ; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, s^{-1} ; A 为初始的屈服应力, MPa; B 为硬化模量, C 为应变率敏感系数, n_{JC} 为硬化指数, m 为温度软化指数, $T^{*m} = \frac{T - T_w}{T_g - T_w}$, T 为材料变形温度, T_w 为室温, T_g 为材料熔化温度。

由于试验处于室温准静态条件下,因此忽略温度软化效应^[18-19],将式(4)简化得到式(5)。

$$\sigma = (A + B\varepsilon^{n_c}) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (5)$$

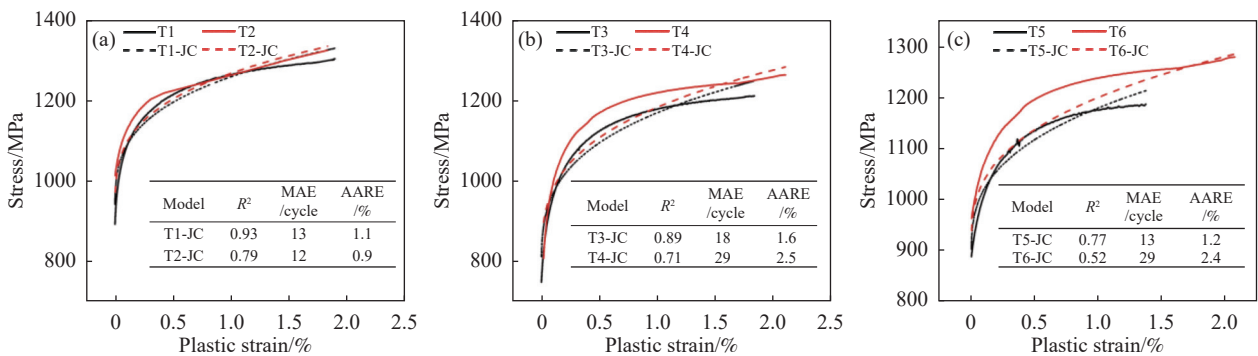
通过真实应力-应变曲线读得初始屈服应力 A 值, 随后采用最小二乘法拟合得出参数 B 和 n_c 的值, 最后基于 $5 \times 10^{-3}/s$ 下的试验数据拟合得到应变率敏感系数 C , 各参数值汇总于表 3 所示。

为定量评估本构模型的预测精度, 采用决定系数 (R^2)、平均绝对相对误差 (AARE) 和平均绝对误差 (MAE) 对预测结果进行分析, 其计算见式 (6) 和式 (7)。从图 4 可以看出, JC 模型在塑性变

形初始阶段与试验数据吻合较好, 但随着塑性应变的增加, 模型预测结果与试验值两者之间的偏差逐渐扩大。从表中评估指标可见, 同一构建方向下不同速率之间的预测精度偏差较大, 说明 JC 模型未能充分反映 L-PBF TC4 钛合金构建方向与应变率之间的内在关系。此外, 模型系统地高估了非 0° 构建试样的流动应力, 尤其在应变超过 1% 后, 其预测的硬化斜率与试验曲线发生明显偏离, 表明标准 JC 模型无法准确描述其材料的力学行为。

表 3 不同本构模型拟合参数
Table 3 Fitting parameters of different constitutive models

Constitutive model	Specimen No.	A	B	n_{JC}	C	K	n_h
JC	T1, T2	892.7	1 307.9	0.275 1	0.003 4		
	T3, T4	748.9	1 552.9	0.282 4	0.005 9		
	T5, T6	889.2	1 430.9	0.334 3	0.008 7		
Hollomon	T1					1 684.3	0.062 6
	T2					1 581.7	0.048
	T3					1 721.1	0.082 8
	T4					1 735.1	0.08
	T5					1 547.9	0.059 5
	T6					1 581.6	0.054



(a) 0° 构建方向; (b) 12° 构建方向; (c) 16° 构建方向

图 4 JC 模型预测曲线与试验曲线对比

Fig. 4 Comparison between JC model predictions and experimental data

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{N_{pre} - N_{exp}}{N_{exp}} \right| \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |N_{exp} - N_{pre}| \quad (7)$$

Hollomon 本构模型是另一种被广泛验证的数学模型, 常用于描述材料在拉伸、压缩或其它力学性能测试中的应力-应变行为^[20]。Hollomon 模型是

描述金属材料在室温下发生塑性变形时, 其真应力与真应变之间关系的经典模型, 其数学表达形式为式 (8)。

$$\sigma = \begin{cases} K\varepsilon & \sigma \leq \sigma_y \\ E^{n_h} \sigma_y^{1-n_h} \varepsilon^{n_h} = K\varepsilon^{n_h} & \sigma \geq \sigma_y \end{cases} \quad (8)$$

其中, σ 为流动应力, MPa; K 为应变硬化系数; n_h 为

应变硬化指数; σ_y 为屈服应力。从中选取真应力-真塑性应变曲线段, 其应力均大于屈服应力, 由此采用 Hollomon 方程 $\sigma = K\varepsilon^{n_h}$, 通过最小二乘法拟合得到参数 K 和 n_h , 各参数值汇总于表 3。

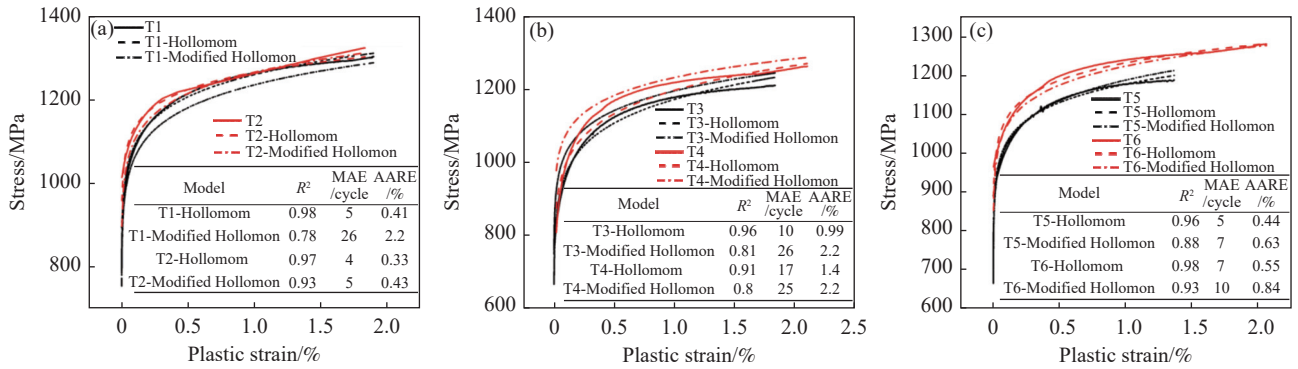
鉴于使用 Hollomon 方程对各应变速率下的数据分别进行拟合, 不足以揭示参数 K, n_h 与构建方向和应变速率之间的内在关联, 因此对 Hollomon 方程进行修正。修正后的参数 K 与 n_h 分别由

式(9)(10)表示, 将修正后的参数带入 Hollomon 方程 $\sigma = K\varepsilon^{n_h}$ 中, 数据处理后得修正的预测曲线图。最终, 试验曲线与两类预测曲线的对比如图 5 所示。

$$K = -3.8X_1 - 1\,348.484Y_1 + 1\,674.667 \quad (9)$$

$$n_h = -0.000\,028X_2 - 1.500\,000Y_2 + 0.066\,966 \quad (10)$$

其中, X_1 和 X_2 为构建方向, Y_1 和 Y_2 为应变速率。



(a)0°构建方向; (b)12°构建方向; (c)16°构建方向

图 5 Hollomon 模型预测曲线与试验曲线对比

Fig. 5 Comparison between Hollomon model predictions and experimental data

由图 5 可知, Hollomon 模型预测曲线与试验曲线总体吻合较好, 说明该模型能够较好地预测该试验条件下的塑性流动应力。从评估指标(R^2 、AARE、MAE)来看, 对于 T2、T4、T5 和 T6 试样, Hollomon 模型的预测性能最优, 修正 Hollomon 模型次之, JC 模型最差; 而在 T1 和 T3 试样中, Hollomon 模型仍表现最佳, JC 模型评估指标则略优于修正 Hollomon 模型。原始 Hollomon 模型虽在所有试样中精度最优, 但由于其对不同构建方向与应变速率的试样均需单独拟合参数, 缺乏统一的预测能力。修正 Hollomon 模型通过统一的方程解决了原始 Hollomon 模型这一缺点, 揭示了构建方向与应变速率之间的内在关联。尽管修正 Hollomon 模型的预测精度较原始 Hollomon 模型略有下降, 但整体上仍然优于 JC 模型, 并能够统一而准确地描述不同构建方向与应变速率下 L-PBF TC4 钛合金的拉伸应力应变响应行为。

3 不同构建方向对 L-PBF TC4 钛合金单轴疲劳行为的影响

3.1 构建方向对应力响应的影响

第二节已探讨了构建方向对 L-PBF TC4 钛合金拉伸行为的影响。为进一步探究 L-PBF TC4 钛

合金在小角度构建方向下的力学响应, 本节通过单轴疲劳试验, 系统分析了不同构建方向下 L-PBF TC4 钛合金的疲劳行为及塑性性能。在单轴疲劳载荷作用下, 材料的轴向应力响应可通过应力幅值随循环周次的变化趋势来表征, 反映了材料在循环变形过程中呈现的软化/硬化特性。

图 6 展示了三个构建方向下, 不同应变幅对应的循环应力幅值随循环周次的变化情况。所有构建方向上的循环应力幅均随应变幅的增加而增大。在较高应变幅(0.8%, 1.0%)作用下, 试样在循环初期出现了短暂的初始硬化, 随后表现为典型的软化特征, 即快速软化后进入循环稳定阶段, 直至断裂失效。而在较低应变幅(0.4%, 0.6%)作用下, 试样的初始硬化阶段基本消失, 试样直接进入循环稳定阶段, 并在最终断裂前发生快速失稳。与传统轧制钛合金相比, L-PBF TC4 钛合金在较高应变幅加载下表现出由循环稳定阶段突变为断裂失效的行为; 而在较低应变幅加载下仍存在断裂前应力快速下降的阶段。这种高应变幅加载下的应力响应突变, 凸显了对 L-PBF TC4 钛合金进行高精度疲劳寿命预测的迫切性与必要性。

3.2 混合物理和数据驱动的疲劳寿命预测

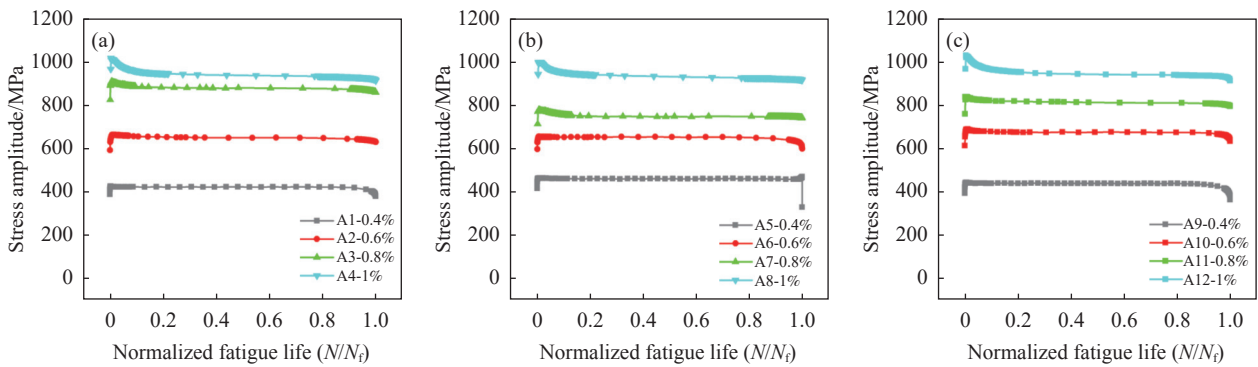
随着数据科学的快速发展, 基于机器学习的

疲劳寿命预测方法逐渐成为研究热点。其中, 人工神经网络(ANN)在该领域应用最为广泛, 特别在疲劳研究领域展现了显著的实用价值^[21]。然而, 纯数据驱动的机器学习模型常存在过拟合和可解释性不足等问题。为了克服这些局限, 融合物理与数据的混合机器学习框架正得到越来越广泛的应用^[22]。将基于变分自编码器-神经网络(VAE-ANN), 并通过引入数据增强技术与混和物理-数据驱动信息, 开发不同构建方向 L-PBF TC4 钛合金的疲劳寿命预测模型。

变分自编码器(VAE)是 Kingma 和 Welling 提出的一种基于深度学习的生成模型, 能够有效学习数据潜在的概率分布, 并生成与原始数据分布高度

相似的新样本^[23]。针对原始数据集规模较小、难以构建有效预测模型的问题^[24], 为了提升疲劳寿命预测的可靠性与泛化能力, 采用 VAE 模型对原始数据集进行扩展, 以增强模型训练数据的多样性与可靠性。

VAE 模型的工作流程如图 7 所示, 其结构主要由编码器和解码器两部分构成, 模型的输入数据为 $X_{i,i=1,2,3,\dots}$, 重构数据为 $X^*_{i,i=1,2,3,\dots}$ 。编码器通过推断网络将输入数据 X 映射为对潜在在变量 z 所对应的概率分布参数, 其在数学上表征为后验分布 $q_\theta(z|x)$ 。解码器则通过生成网络对潜在在变量 z 进行非线性变换, 重构出新的数据样本 X^* , 该过程对应似然分布 $p_\theta(x|z)$ 。



(a)0°构建方向; (b)12°构建方向; (c)16°构建方向

图 6 不同构建方向循环应力幅变化情况

Fig. 6 Evolution of cyclic stress amplitude with different build directions

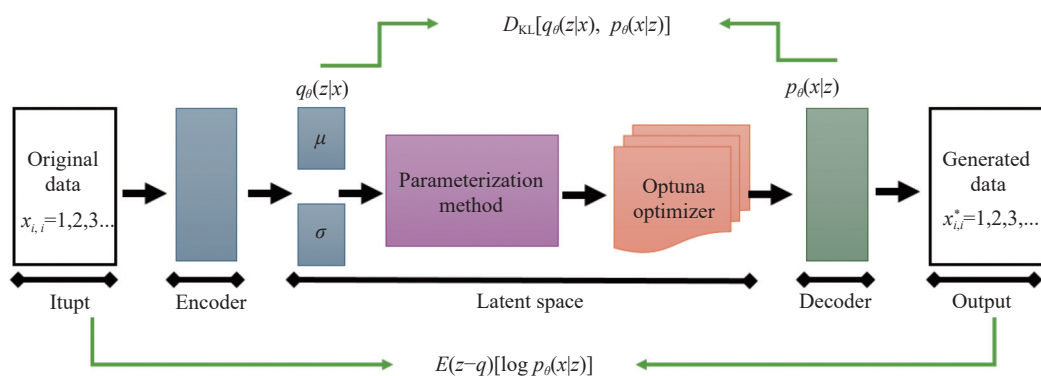


图 7 VAE 的工作流程

Fig. 7 VAE workflow

编码器和解码器借助激活函数实现必不可少的非线性变换, 该类变换构成神经网络逼近任意复杂连续函数的理论基础, 使 VAE 能够有效地捕捉独立变量和因变量之间的复杂关系。采用 Leaky ReLU 作为激活函数, 其方程为式 (11)。

$$f_{\text{LeakyReLU}}(x) = \begin{cases} x & x > 0 \\ 0.01x & \text{其它} \end{cases} \quad (11)$$

人工神经网络(ANN)是一种受生物大脑神经系统启发而建立的数学计算模型。通过引入激活函

数实现非线性变换,从而能够处理极其复杂的非线性问题。在 ANN 模型中同样使用 Leaky ReLU 函数作为激活函数。采用五层 ANN 模型:输入层用于接收初始特征变量;隐藏层通过激活函数进行非线性映射,并由公式 (12) 表示;输出层生成最终的回归预测值。

$$y_i = f_j \left(b_j + \sum_{i=1}^d \omega_{i,j} x_i \right) \quad (12)$$

其中, $\omega_{i,j}$ 为神经网络的权重参数, x_i 为输入变量, f_j 采用 Leaky ReLU 激活函数, y_i 为神经元响应。

通过对 L-PBF TC4 钛合金力学性能及单轴疲劳行为的研究,选取构建方向、加载应变幅和最大最小应力幅作为输入特征,以疲劳寿命作为输出量。

数据驱动模型的输入特征见表 4。

对输入输出特征统一进行归一化处理,如式 (13)^[25] 所示。

$$x^* = \begin{cases} \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & x \text{ 为输入特征} \\ \frac{\log_{10} x - \log_{10} x_{\min}}{\log_{10} x_{\max} - \log_{10} x_{\min}} & x \text{ 为输出特征} \end{cases} \quad (13)$$

VAE-ANN 模型的工作流程如图 8 所示。利用 VAE 将原始数据集进行扩展,生成 500 组样本。为保证 ANN 模型预测的准确性,将扩展后的数据划分为训练集和测试集,其中 70% 作为训练集用于模型的学习和训练,30% 作为测试集用于最终评估模型的泛化性能。

表 4 输入特征
Table 4 The input features

Uniaxial fatigue test parameters			L-PBF parameters
Loading strain amplitude/%	Max. response stress amplitude of A1~A12/MPa	Min. response stress amplitude of A1~A12/MPa	Building direction/(°)
0.4, 0.6, 0.8, 1.0	473,884,839,889,579,604,1002,909,472,740,871,879	-220,-375,-883,-938,-352,-599,-479,-920,-288,-533,-727,-965	0, 12, 16

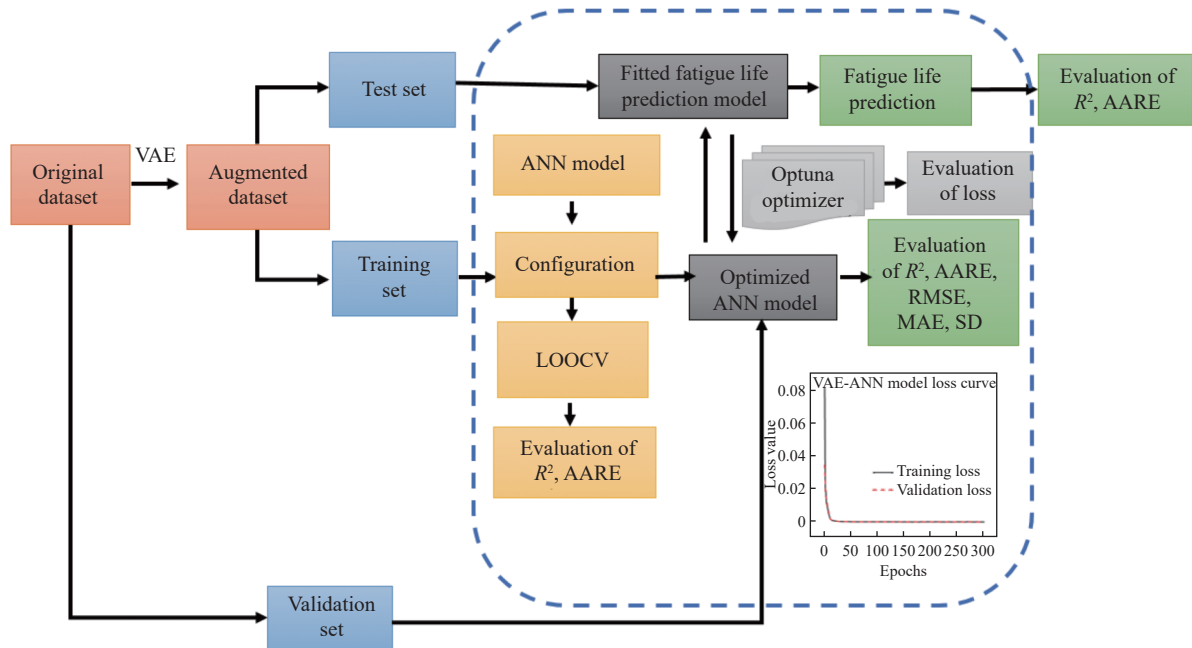


图 8 VAE-ANN 模型工作流程
Fig. 8 Workflow of the VAE-ANN model

在对模型进行参数优化前,需确定超参数的调整范围。对于数据扩展超参数范围为潜在维度 (2~50),学习速率 (10^{-4} ~ 10^{-1})和批次大小 (16~128);对于寿命预测模型超参数范围为隐藏层 1 (32~256),隐藏层 2 (16~128),隐藏层 3 (32~256)和学习速率 (10^{-4} ~ 10^{-1})。协方差矩阵自适应进化策略(CMA-ES)

是一种通过自适应调整搜索分布来优化复杂函数的进化算法。在模型优化过程中,基于 CMA-ES 对 VAE 和 VAE-ANN 模型进行超参数优化,最优化的 VAE 和 VAE-ANN 模型超参数如表 5 和表 6 所示。

图 8 右下角所示为 VAE-ANN 模型的训练损失曲线。该曲线表明,模型在训练过程中表现稳定

且收敛良好, 训练出精度较高、可靠性较好的疲劳寿命预测模型。

表 5 最优化 VAE 模型超参数

Table 5 Optimized hyperparameters of VAE models

Model	Hyperparameters		
	Latent space	Batch size	Learning rate
VAE	2	119	4.48×10^{-3}

表 6 最优化 VAE-ANN 模型超参数

Table 6 Optimized hyperparameters of VAE-ANN models

Model	Hyperparameters			
	Hidden layer 1	Hidden layer 2	Hidden layer 3	Learning rate
VAE-ANN	204	111	25	0.97×10^{-4}

利用该模型对原始 12 组数据进行寿命预测, 其性能评估指标决定系数(R^2)、平均绝对相对误差 (AARE) 和平均绝对误差 (MAE) 如图 9 中表格所示。

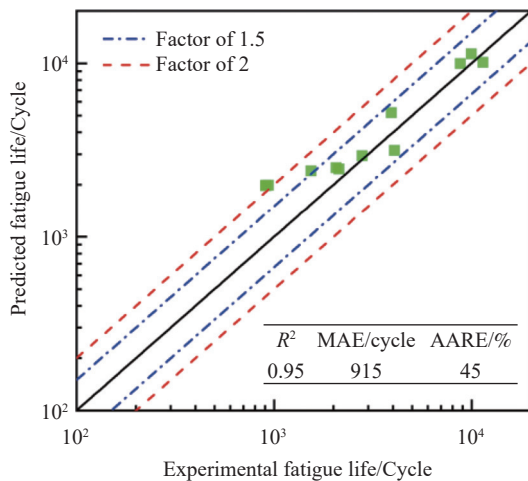


图 9 原始数据预测结果

Fig. 9 Prediction results of raw data

参考文献

- [1] WANG Q, LI Z, ZHANG H J, *et al.* Research progress on additively manufactured Ti6Al4V matrix composites[J]. Materials China, 2023, 42(5): 375-390.
(王琪, 李智, 张海军, 等. 增材制造 Ti6Al4V 基复合材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(5): 375-390.)
- [2] WANG Q, ZHANG K, QIU D, *et al.* Additive manufacturing of high-strength commercially pure titanium through lanthanum oxide addition[J]. Materials Characterization, 2021, 176: 111074.
- [3] OLIVEIRA J P, LALONDEP A D, MA J. Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing[J]. Materials & Design, 2020, 193: 108762.
- [4] MOEINFAR K, KHODABAKHSHI F, KASHANI-BOZORG S F, *et al.* A review on metallurgical aspects of laser additive manufacturing (LAM): Stainless steels, nickel superalloys, and titanium alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 16: 1029-1068.
- [5] NICOLETTO G, KONEČNÁ R, FRKÁŇ M, *et al.* Surface roughness and directional fatigue behavior of as-built EBM and DMLS Ti6Al4V[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 116: 140-148.

决定系数 R^2 达到 0.95, 表明此模型能够较好地解释疲劳寿命与输入参数间的主要变化关系, 拟合效果良好; 平均绝对相对误差达 45%, 表明此模型对寿命预测具有一定的工程参考价值。从图 9 可见预测结果较好, 大部分预测点分布于 1.5 倍误差线以内; 结合平均绝对相对误差可知, 在高应变幅-短寿命区域模型预测偏差较大, 但预测结果仍然保持在 2 倍误差带以内。

4 结论

1) 沿 16° 方向构建的 L-PBF TC4 钛合金在高应变速率下表现出最佳的塑性, 小范围内变化的构建角度会显著影响 L-PBF TC4 钛合金的力学性能, 合理选择构建方向可以显著提升材料的塑性性能。

2) 修正后的统一 Hollomon 整合了不同构建方向及应变速率下 L-PBF TC4 钛合金的拉伸本构模型, 且整体预测性能优于 JC 模型, 准确地描述了 L-PBF TC4 钛合金在拉伸过程中的应力-应变响应。

3) 在较高应变幅(0.8%, 1.0%)作用下, 试样在循环初期出现了短暂的初始硬化, 随后表现为典型的软化特征。而在较低应变幅(0.4%, 0.6%)作用下, 试样的初始硬化阶段消失, 直接进入循环稳定阶段直至快速断裂。

4) 基于混合物理与数据驱动的 VAE-ANN 模型对 L-PBF TC4 钛合金单轴疲劳寿命进行预测, 所有结果均分布于 2 倍误差带内, 准确地预测了不同构建方向下 L-PBF TC4 钛合金的疲劳寿命。

- [6] PERSENOT T, BURR A, MARTIN G, *et al.* Effect of build orientation on the fatigue properties of as-built electron beam melted Ti-6Al-4V alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 118: 65-76.
- [7] PAUL M, SOMAN S, SHAO S, *et al.* Fatigue crack growth in L-PBF Ti-6Al-4V: Influence of notch orientation, stress ratio, and volumetric defects[J]. *International Journal of Fatigue*, 2025, 198: 109027.
- [8] BARRICELLI L, PATRIARCA L, DU PLESSIS A, *et al.* Orientation-dependent fatigue assessment of Ti6Al4V manufactured by L-PBF: Size of surface features and shielding effect[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 168: 107401.
- [9] ZHANG X, GONG S, WANG Y, *et al.* A modified SWT model for very high cycle fatigue life prediction of L-PBF Ti-6Al-4V alloy based on single defect: Effect of building orientation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2024, 188: 108514.
- [10] MA T H, ZHOU C Y, GAO N, *et al.* Low cycle fatigue behavior of CP-Ti under multiaxial load-controlled mode at different multiaxial stress ratios[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 160: 106868.
- [11] MA T H, CHANG L, GUO S, *et al.* Comparison of multiaxial low cycle fatigue behavior of CP-Ti under strain-controlled mode at different multiaxial strain ratios[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 140: 105818.
- [12] ASTM F2924-14. Standard specification for additive manufacturing titanium-6aluminum-4vanadium with powder bed fusion[S]. West Conshohocken: ASTM International. 2021.
- [13] ASTM F1472-20a. Standard specification for wrought titanium-6aluminum-4vanadium alloy for surgical implant applications (UNS R56400) [S]. West Conshohocken: ASTM International. 2023.
- [14] SHANG D G, YAO W X. Study on multiaxial fatigue damage parameter based on critical plane approach[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 1999(4): 295-298.
(尚德广, 姚卫星. 基于临界面法的多轴疲劳损伤参量的研究[J]. *航空学报*, 1999(4): 295-298.)
- [15] National Technical Committee for Steel Standardization of China. Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1-2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021.
(全国钢标准化技术委员会. 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法 GB/T 228.1-2021[S]. 北京: 中国标准出版社. 2021.)
- [16] FANG X W, GUAN J J. Constitutive model and failure parameters of TC4 titanium alloy under quasi-static tension[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2022, 44(4): 831-836.
(方新文, 管佳佳. TC4 钛合金在准静态拉伸下的本构模型及失效参数[J]. *机械强度*, 2022, 44(4): 831-836.)
- [17] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [18] WANG Z J, WANG Z W. Simulation study of metal tensile experiments based on J-C constitutive model[J]. *Xinjiang Iron and Steel*, 2024(2): 31-33.
(王子骏, 王子文. 基于 J-C 本构模型的金属拉伸实验模拟研究[J]. *新疆钢铁*, 2024(2): 31-33.)
- [19] WANG Y K, ZHAO J X. Tensile fracture test and numerical simulation of Q235 steel[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26(1): 168-173.
(王玉凯, 赵建新. Q235 钢拉伸断裂试验与数值仿真[J]. *塑性工程学报*, 2019, 26(1): 168-173.)
- [20] NEERAJ T, HOU D H, DAEHN G S, *et al.* Phenomenological and microstructural analysis of room temperature creep in titanium alloys[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(6): 1225-1238.
- [21] CHEN D, LI Y, LIU K, *et al.* A physics-informed neural network approach to fatigue life prediction using small quantity of samples[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 166: 107270.
- [22] WANG H, LI B, GONG J, *et al.* Machine learning-based fatigue life prediction of metal materials: Perspectives of physics-informed and data-driven hybrid methods[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 284: 109242.
- [23] KINGMA D P, WELING M. Auto-Encoding Variational Bayes[M]. arXiv, 2022.
- [24] HOÑAS J, BÉHAL J, HOMOLA P, *et al.* A machine learning based approach with an augmented dataset for fatigue life prediction of additively manufactured Ti-6Al-4V samples[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 293: 109709.
- [25] ZHOU C, WANG H, HOU S, *et al.* A hybrid physics-based and data-driven method for gear contact fatigue life prediction[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 175: 107763.