

基于数据驱动的增材制造铝合金的疲劳寿命预测

詹志新^{1**} 高同州¹ 刘传奇² 吴圣川^{3***}

(¹ 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京, 100191)(² 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京, 100190)

(³ 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 成都, 610031)

摘要 增材制造金属材料的疲劳损伤及寿命预测问题是当前研究的热点. 论文以增材制造 AlSi10Mg 为典型应用对象, 采用数据驱动方法开展疲劳寿命预测, 考虑到其疲劳试验数据有限, 采用经过试验验证的可靠的理论模型和数值计算方法来获取足够的疲劳数据, 以弥补试验数据的不足. 首先, 提出了基于缺陷特征参数的疲劳损伤模型, 其次, 建立了理论模型的数值实现方法, 并将数值计算结果与试验结果进行对比, 验证了所提方法的可靠性. 然后, 开展数据驱动模型的训练与预测, 采用 K 最近邻的数据驱动算法预测了增材制造 AlSi10Mg 的疲劳寿命, 最后, 深入分析了疲劳寿命随增材制造内部缺陷、疲劳载荷的变化规律, 研究了数据驱动模型的训练数据量及模型参数对预测精度的影响.

关键词 数据驱动, 增材制造, 铝合金, 疲劳, 寿命预测

DOI: 10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2022.045

0 引言

相比于传统的制造加工工艺, 增材制造技术具有无模具、周期短、成本低等优点, 通过自下而上逐层堆积的方式, 可以直接将数字化模型制造为实体零件, 极大地促进了制造业的发展, 近些年在航空航天、轨道交通、汽车、生物医学、军工等领域等到了较为广泛的应用^[1-3]. 而在实际应用中, 增材制造金属材料/结构往往承受循环载荷, 使得其疲劳损伤破坏成为一种典型的失效模式. 因此, 为了提高增材制造金属构件在服役过程中的安全可靠, 有必要研究其疲劳损伤及寿命预测方法.

当前, 国内外学者针对增材制造材料/结构的疲劳问题, 从微结构表征、高低周疲劳、增材工艺及缺陷影响等方面开展了大量的研究工作. Fatemi 等^[4]从性能、分析及应用分析了表面处理、缺陷和热处理对增材制造金属材料多轴疲劳性能的影响. Komarasamy 等^[5]从试验方面研究了增材制造的镍合金的

微观结构、疲劳和冲击韧性性能. Romano 等^[6]对增材制造 AlSi10Mg 的疲劳性能开展了基于缺陷的数值模拟和疲劳强度的预测工作. Carneiro 等^[7]研究了增材制造 17-4PH 不锈钢的循环变形和疲劳行为. Yamashita 等^[8]对增材制造镍基合金开展了缺陷分析和疲劳设计研究. 吴圣川等^[9-11]深入研究了缺陷对增材制造 AlSi10Mg 疲劳性能的影响, 从试验、力学模型、数值模拟等三个方面分析了缺陷的影响机理. 朱顺鹏等^[12]基于尺寸效应和概率分析研究了增材制造材料的缺陷容限疲劳评估方法. 朱继宏等^[13]基于微观力学模型分析了增材制造 316 钢高周疲劳性能的微观力学行为, 发现增材制造 316 钢相较于轧制 316 钢具有更好的高周疲劳性能. 王英玉等^[14]研究了缺口尺寸、载荷水平和载荷路径等对增材制造 316L 钢缺口根部塑性区的影响, 提出了缺口根部塑性区的表征方法. 肖来荣等^[15]研究了激光增材制造 GH3536 合金的低周疲劳行为, 结果表明温度和应变的增加会缩短合金的疲劳寿命. 易敏

* 非线性力学国家重点实验室开放基金项目和国家自然科学基金大科学装置联合基金项目(U2032121)资助.

2022-07-26 收到邀请稿, 2022-10-14 网络首发.

** 通讯作者. E-mail: zzxupc@163.com.

*** 通讯作者. E-mail: wusc@swjtu.edu.cn.

等^[16]开展了增材制造微结构演化及疲劳分散性计算,揭示了工艺参数-微结构-力学性能之间的关联规律.贺小帆等^[17]研究了柱状晶粒的微观纹理和取向对

增材制造钛合金内部孔隙、疲劳裂纹萌生及疲劳寿命的影响.鲍蕊等^[18]基于近场动力学的方法研究了 α/β 相界面对增材制造钛合金中疲劳裂纹偏折的影响.

此外,金属材料/结构的疲劳损伤分析及寿命预测方法也得到了广泛研究,比较常用的有临界面法^[19]、能量法^[20]、相场法^[21]、损伤力学^[22]及断裂力学方法^[23]等等,虽然唯象型疲劳理论模型在增材制造金属的疲劳分析方面取得一定进展,但仍面临疲劳寿命预测精度偏低的挑战.近些年发展起来的数据驱动方法^[24,25]为增材制造金属材料的疲劳损伤分析及寿命预测提供了一种可行的途径.但是,数据驱动方法需要相当数量且可靠的疲劳数据开展训练,才能取得较好的预测结果,而增材制造金属材料的疲劳试验相对耗时耗力,获得大量的试验数据成为制约其广泛应用的条件.而在小样本的疲劳预测方面,数据驱动方法的预测精度很大程度上取决于模型参数的选取、优化,以及训练数据库的质量.当前并无一致的基本原则和适用范围,需针对具体的问题,通过预测结果的对比分析,选择最优的数据驱动模型及超参数.基于上述分析,本文采用经过试验验证的可靠的理论模型和数值计算方法来获取足够的疲劳数据,以弥补试验数据的不足.

本文以增材制造 AlSi10Mg 为重点研究对象,采用数据驱动方法对其进行疲劳寿命预测.首先,根据损伤力学理论,提出了基于缺陷特征参数的疲劳损伤模型,该模型通过引入缺陷尺寸参数 $\sqrt{\text{area}}$,椭圆的长宽比参数 AR ,以及从缺陷中心点到表面的最短距离 l ,可以合理地反映内部缺陷对增材制造金属材料损伤演化及疲劳寿命的影响.其次,结合增材制造 AlSi10Mg 的静力拉伸和疲劳试验,标定了损伤耦合的弹塑性本构模型及基于缺陷特征参数的疲劳损伤模型的材料参数.然后,建立了理论模型的数值实现方法,并将数值计算结果与试验结果进行对比,验证了所提模型及数值方法的可靠性,进而对于不同的增材工艺方向,计算了不同循环载荷作用

下的增材制造 AlSi10Mg 的疲劳寿命,并将计算结果与试验数据一同作为数据驱动模型的数据库,用于数据驱动模型的训练与预测.最后,采用 K 最近邻(K-Nearest Neighbor, KNN)的数据驱动算法,预测了增材制造 AlSi10Mg 的疲劳寿命,并进行了深入的讨论分析.

1 理论模型

1.1 损伤耦合的弹塑性本构模型

根据连续损伤力学理论,材料/结构内部微裂纹或微孔洞对材料力学性能的影响可以通过材料内部的代表性体积单元(RVE)的损伤变量 D 来表示.一般而言,损伤变量^[26]定义为材料内部某一横截面上的微裂纹/微孔洞的总面积 S_D 与横截面的面积 S 之比:

$$D = \frac{S_D}{S} \quad (1)$$

基于损伤变量的概念,在完全无损材料的虚拟状态下可得到有效应力 σ_{ij}^{eff} ^[27],即:

$$\sigma_{ij}^{\text{eff}} = \frac{\sigma_{ij}}{1-D} \quad (2)$$

其中, σ_{ij} 是柯西应力,由此可得材料的有效横截面面积为 $S_{\text{eff}} = S(1-D)$.

本文采用损伤耦合的弹塑性本构模型,考虑小变形假设,总应变 ϵ_{ij} 为:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p \quad (3)$$

其中, ϵ_{ij}^p 是塑性应变, ϵ_{ij}^e 为弹性应变,如下:

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \left(\frac{\sigma_{ij}}{1-D} \right) - \frac{\nu}{E} \left(\frac{\sigma_{kk} \delta_{ij}}{1-D} \right) \quad (4)$$

而塑性应变的演化率为应变对时间的导数,可表述如下^[28]:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{\dot{\lambda}}{1-D} \frac{S_{ij}/(1-D) - \alpha_{ij}}{[S_{ij}/(1-D) - \alpha_{ij}]_{\text{eq}}} \quad (5)$$

$$\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{\dot{\lambda}}{1-D} \quad (6)$$

这里, $\dot{\lambda}$ 是塑性乘子, α_{ij} 和 S_{ij} 是背应力和柯西应力偏量, \dot{p} 是累积塑性应变率.本文采用的考虑损伤的非线性运动硬化模型如下所示^[28]

$$\alpha_{ij} = \sum_{k=1}^K \alpha_{ij}^{(k)}, \quad \dot{\alpha}_{ij}^{(k)} = (1-D) \left(\frac{2}{3} C_k \dot{\epsilon}_{ij}^p - \gamma_k \alpha_{ij}^{(k)} \dot{p} \right) \quad (7)$$

其中, C_k 和 γ_k 为材料参数, K 为背应力的个数, k 指的是第 k 个背应力。

1.2 基于缺陷特征参数的疲劳损伤模型

对于高周疲劳而言, 疲劳损伤演化和疲劳寿命往往由循环载荷决定。在单轴循环载荷作用下, 基于损伤力学的非线性疲劳损伤模型可用下式^[29]表示:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dN} = a \left[\frac{\sigma_a}{(1-b\sigma_m)(1-D)} \right]^\beta \quad (8)$$

其中, \dot{D} 是损伤演化率, N 是循环加载周次, σ_a 是应力幅值, σ_m 是平均应力, a , b 和 β 是材料参数。在多轴循环加载下, 疲劳损伤模型可用下式表示:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dN} = a \left[\frac{A_{II}}{(1-b\sigma_{H,m})(1-D)} \right]^\beta \quad (9)$$

$$A_{II} = \frac{1}{2} \left[\frac{3}{2} (S_{ij,max} - S_{ij,min}) \cdot (S_{ij,max} - S_{ij,min}) \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\sigma_{H,m} = \frac{1}{6} (\sigma_{kk,max} + \sigma_{kk,min}) \quad (11)$$

其中, A_{II} 是八面体剪切应力幅值, $\sigma_{H,m}$ 是平均静水应力。

文献研究表明^[9-11], 增材制造金属材料的疲劳损伤演化和疲劳寿命会受到内部缺陷的显著影响, 具体来说, 有三个重要的内部缺陷的外形特征参量, 即 Murakami 缺陷尺寸参数 $\sqrt{\text{area}}$, 椭圆的长宽比参数 AR , 以及从缺陷中心点到表面的最短距离 l 。一般而言, 增材制造 AlSi10Mg 的缺陷尺寸越大, 长宽比越大, 材料的疲劳损伤演化速率越快, 疲劳寿命

越短。由此, 本文提出基于缺陷特征参数的增材制造金属材料的疲劳损伤演化模型如下所示。对于单轴循环加载情况:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dN} = a \left\{ \frac{\sigma_a [1 + (AR \sqrt{\text{area}}/l)^n]}{(1-b\sigma_m)(1-D)} \right\}^\beta \quad (12)$$

对于多轴循环加载情况:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dN} = a \left\{ \frac{A_{II} [1 + (AR \sqrt{\text{area}}/l)^n]}{(1-b\sigma_{H,m})(1-D)} \right\}^\beta \quad (13)$$

其中, n 是材料参数, 而 $A_{II} [1 + (AR \sqrt{\text{area}}/l)^n]$ 项反映了由内部缺陷所引起的应力集中对材料疲劳性能的影响。在应力幅值和平均应力为常值的情况下, 对上述两式分别进行积分, 可得下式, N_f 是疲劳寿命。

$$N_f = \frac{1}{a(1+\beta)} \left\{ \frac{\sigma_a [1 + (AR \sqrt{\text{area}}/l)^n]}{(1-b\sigma_m)} \right\}^{-\beta} \quad (14)$$

$$N_f = \frac{1}{a(1+\beta)} \left\{ \frac{A_{II} [1 + (AR \sqrt{\text{area}}/l)^n]}{(1-b\sigma_{H,m})} \right\}^{-\beta} \quad (15)$$

2 材料参数标定及数值实现方法

2.1 增材制造 AlSi10Mg 的疲劳试验

本节简要介绍增材制造 AlSi10Mg 的静力拉伸和疲劳试样的制备, 具体过程可参考文献^[9]。增材工艺的方向包括轴向(H向)和垂向(V向)两种方式, 如图 1(a) 所示。采用 BLT-S310 设备来获得 AlSi10Mg 块体, AlSi10Mg 粉末尺寸在 15 至 45 微

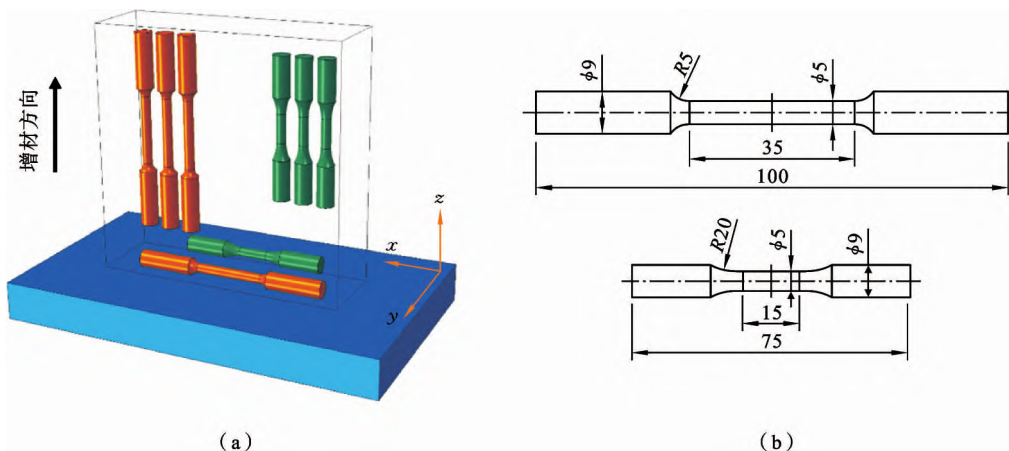


图 1 (a) 增材制造工艺图示; (b) 增材制造 AlSi10Mg 的静力拉伸和疲劳试样

Fig. 1 (a) Illustration of the AM process; (b) Static tensile and fatigue specimens of AM AlSi10Mg

米之间. 增材制造参数如下: 激光功率在 360 W 到 400 W 之间, 扫描速度在 1200 m/s 到 1500 m/s 之间, 扫描间距在 0.13 mm 到 0.16 mm 之间, 扫描层厚约为 50 μm. 为了消除残余应力, 加工完成的 AlSi10Mg 块体在 300 °C 下加热两小时后, 又在熔炉中冷却. 最后, 通过对 AlSi10Mg 块体进行精加工设计, 制造出如图 1(b) 所示的单轴拉伸和疲劳试样.

2.2 基于力学试验的材料参数标定

对于不同的增材方向, AlSi10Mg 的力学性能 (静力和疲劳) 有很大差异. 本文采用了各向同性的损伤本构模型, 对于不同的增材方向, 分别标定了材料相应的静力力学性能参数和疲劳性能参数, 以此来反映增材方向的不同所导致的材料性能的差异. 对于相同的增材方向所加工制造的 AlSi10Mg 试样, 材料的力学性能认为是各向同性的. 对于损伤耦合的本构模型, 采用单轴拉伸应力-应变曲线来标定增材制造 AlSi10Mg 的静力性能参数. 在单轴加载

条件下, 材料的应力-应变曲线关系如下式所示:

$$\sigma = \sum_{k=1}^K \frac{C_k}{\gamma_k} (1 - e^{-\gamma_k \epsilon_p}) + \sigma_y \quad (16)$$

基于最小二乘法, 拟合得到三组材料参数 C_k 和 γ_k , 如表 1 所示. 拟合的增材制造 AlSi10Mg 的应力-应变曲线如图 2 所示. 对于基于缺陷特征参数的疲劳损伤演化模型, 有四个材料参数 a, b, n 和 β 需要标定. 根据增材制造 AlSi10Mg 在不同循环载荷下的疲劳实验数据, 采用最小二乘法得到四个材料参数, 拟合得到的 S-N 曲线如图 3 所示. 相比于 V 向, H 向增材制造 AlSi10Mg 实验数据的分散性较大, 而内部缺陷形貌及位置的不确定性是导致实验数据分散的重要因素. 在参数标定和曲线拟合过程中, 采用的是试验中值寿命, 因此, H 向的标定曲线与实验数据偏差较大. 此外, 对于三个缺陷特征参数, $\sqrt{\text{area}}$, AR 和 l , 则基于试验的微观测试分析得到^[9]. 所有参数在表 2 中列出.

表 1 增材制造 AlSi10Mg 的静力性能参数

Table 1 Static performance parameters of AM AlSi10Mg

增材方向	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	C_1	C_2	C_3	γ_1	γ_2	γ_3
H 向	185	273	5143.0	7171.5	1500	68.1	250	180
V 向	181	273	4545.5	8005.1	1509.8	63.6	290.0	63.6

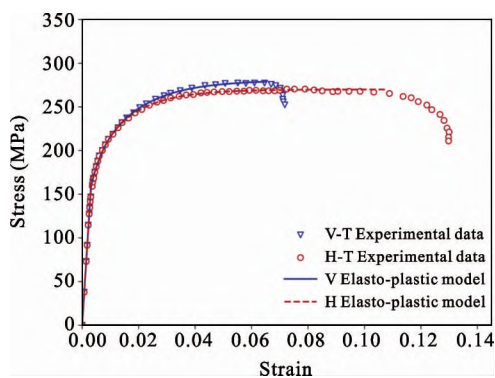


图 2 不同增材方向的 AlSi10Mg 应力应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of AlSi10Mg in different additive directions

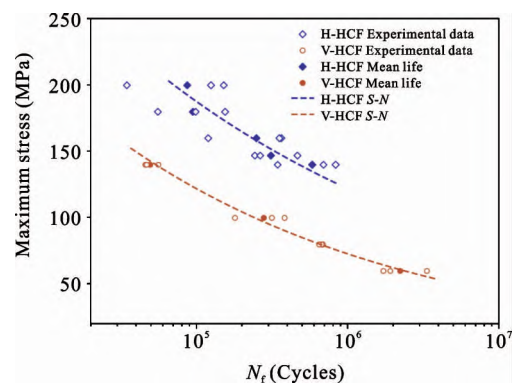


图 3 增材制造 AlSi10Mg 的疲劳实验数据及 S-N 曲线
Fig. 3 Fatigue test data and S-N curve of AM AlSi10Mg

表 2 增材制造 AlSi10Mg 的疲劳性能参数

Table 2 Fatigue performance parameters of AM AlSi10Mg

增材方向	$\sqrt{\text{area}}$	AR	l	a	b	β	n
H 向	139	2.9	219.62	1E-20	1E-4	5.295	2.523
V 向	413	2.1	553.42	1E-16	1E-4	4.441	2.213

2.3 基于缺陷特征参数的疲劳损伤模型的数值实现

本文基于 ABAQUS 平台,通过自编 UMAT 用户材料子程序以实现基于缺陷特征参数的疲劳损伤演化模型,进而发展损伤力学有限元数值计算方法.在该算法中,含损伤的增材制造 AlSi10Mg 的应力及应变,损伤变量和雅可比矩阵都会随循环加载不断更新迭代.此外,采用了跳跃周期法来节省循环载荷作用下的计算时间.增材制造 AlSi10Mg 的疲劳损伤和疲劳寿命的计算流程简述如下:(1) 初始化计算模型的参数.(2) 在疲劳载荷作用下,基于耦合损伤的弹塑性本构模型计算含损伤增材制造 AlSi10Mg 的应力及应变.(3) 基于缺陷特征参数的疲劳损伤模型计算增材制造 AlSi10Mg 的疲劳损伤累积,由于一次加载过程中损伤增量很小,对应力应变场的影响也很小.为了减小计算量,采用了跳跃周期法^[30-33],根据下式计算 ΔN 次循环载荷产生的损伤变量增量: $D^{i+1} = D^i + (dD/dN)^i \cdot \Delta N$. (4) 对材料的力学性能参量进行折减,进而再次计算应力、应变及疲劳损伤.(5) 当损伤变量达到 1 时,停止计算,得到增材制造 AlSi10Mg 的疲劳寿命;若损伤变量

未达到 1,重复以上过程.

2.4 增材制造 AlSi10Mg 的疲劳寿命计算

根据对称性,在 ABAQUS 中建立 1/8 增材制造 AlSi10Mg 试件的有限元模型,如图 4(a)所示.通过对有限元网格进行收敛性分析,可知在单元最小尺寸为 $0.14 \text{ mm} \times 0.17 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$ 的情况下,应力的计算结果是收敛的,有限元模型共包含 9600 个 C3D8 单元,11615 个节点.疲劳载荷施加在右端面,对称约束施加在模型的三个对称面上,如图 4(b)所示.表 3 中给出了两种不同增材制造方向(H 向和 V 向),不同循环载荷下($\sigma_m = 180 \text{ MPa}$, $\sigma_a = 81 \text{ MPa}$; $\sigma_m = 100 \text{ MPa}$, $\sigma_a = 45 \text{ MPa}$), AlSi10Mg 疲劳寿命的数值计算结果,可以看到,其与文献[9]中的试验数据吻合较好,验证了所提出的基于缺陷特征参数的疲劳损伤模型的适用性.图 5 和图 6 分别展示了两种不同情况下增材制造 AlSi10Mg 的应力及损伤分布云图、损伤度及弹性模量随循环次数的变化曲线.计算结果表明,损伤度随着循环次数的增加逐渐变大,在后 20% 的疲劳寿命中剧烈增长.弹性模量随着损伤的越加而降低,进而材料的承载能力降低,直至裂纹萌生.

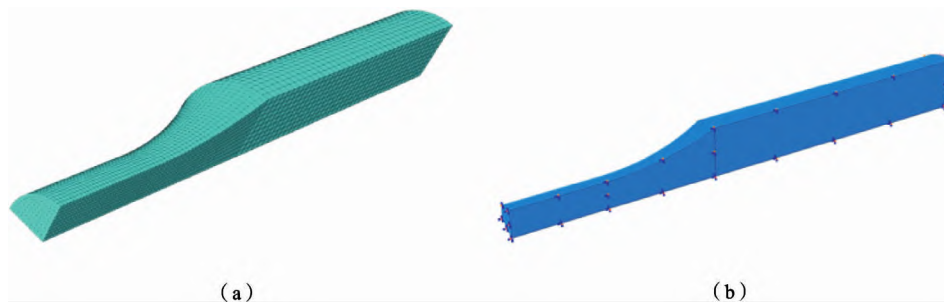


图 4 (a) 增材制造 AlSi10Mg 的 1/8 有限元模型; (b) 边界条件示意图

Fig. 4 (a) 1/8 finite element model of AM AlSi10Mg; (b) Schematic diagram of boundary conditions

表 3 疲劳寿命预测结果

Table 3 Fatigue life prediction results

增材方向	σ_{max}	σ_a	N_{exp}	N_{pre}	Error
H 向	180	81	94958	111000	16.89%
V 向	100	45	279688	223200	20.19%

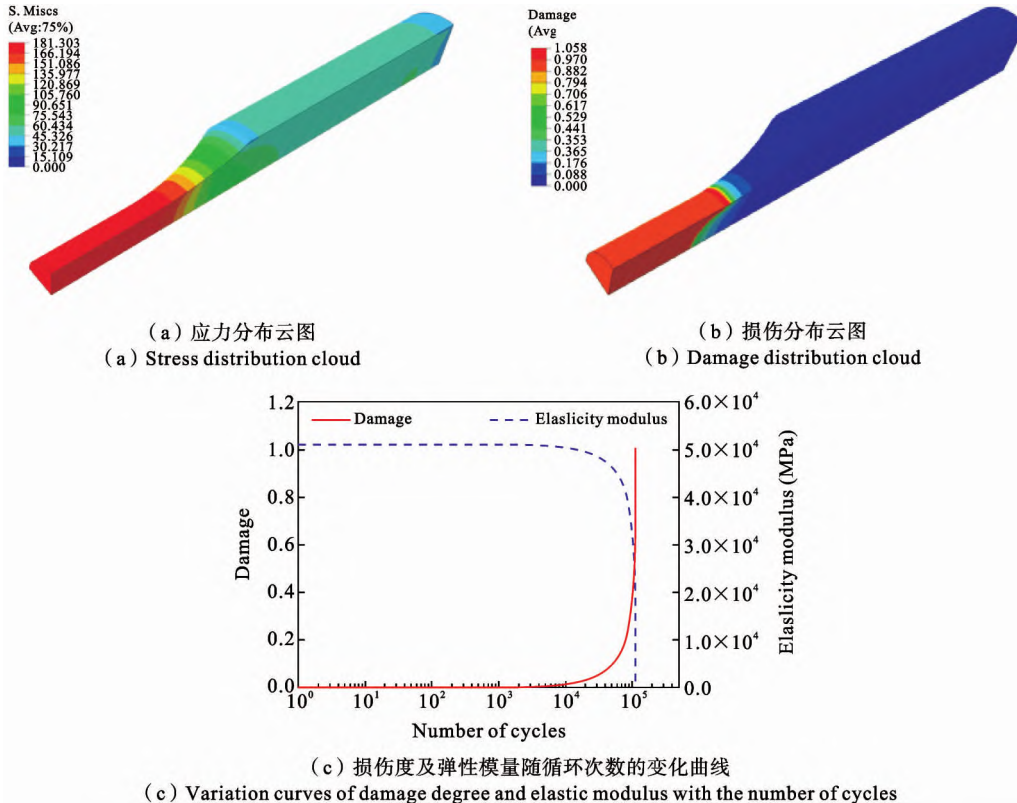


图 5 增材制造方向为 H 向, 循环载荷为 $\sigma_m = 180$ MPa, $\sigma_a = 81$ MPa 情况下

Fig. 5 For the case of H-direction of the additive manufacturing, the cyclic load $\sigma_m = 180$ MPa, $\sigma_a = 81$ MPa

3 基于数据驱动的疲劳寿命预测方法

验证完上述所提出的基于缺陷特征参数的疲劳损伤演化模型及数值计算方法的之后, 将针对于不同的增材工艺方向, 计算不同循环载荷作用下的增材制造 AlSi10Mg 的疲劳寿命, 并将计算结果与试验数据一同作为数据驱动模型的数据库, 用于后续的数据驱动模型的训练与预测. 本文采用 K 最近邻 (K-Nearest Neighbor, KNN)^[34] 的数据驱动算法, 来预测增材制造 AlSi10Mg 合金的疲劳寿命. 计算流程如图 7 所示.

3.1 KNN 算法

基于监督学习策略, KNN 是一种非参数化的常用的数据驱动算法, 它具有简单、高效和直观的有点, 并且对处理有噪声干扰的训练数据集具有较好的鲁棒性. 一般而言, 该算法认为要预测的数据与现有的数据在某种程度上具有一定的相似性, 预测结果为其 K 个最近的邻居的平均值, 且较近的邻居比较远的邻居对平均值贡献更大. 基于 KNN 算法的增材制造 AlSi10Mg 的疲劳寿命预测流程简述如下:

初始化参数, 预处理疲劳数据. 为了便于数值求解并保持算法的稳定性, 一般要对输入向量进行归

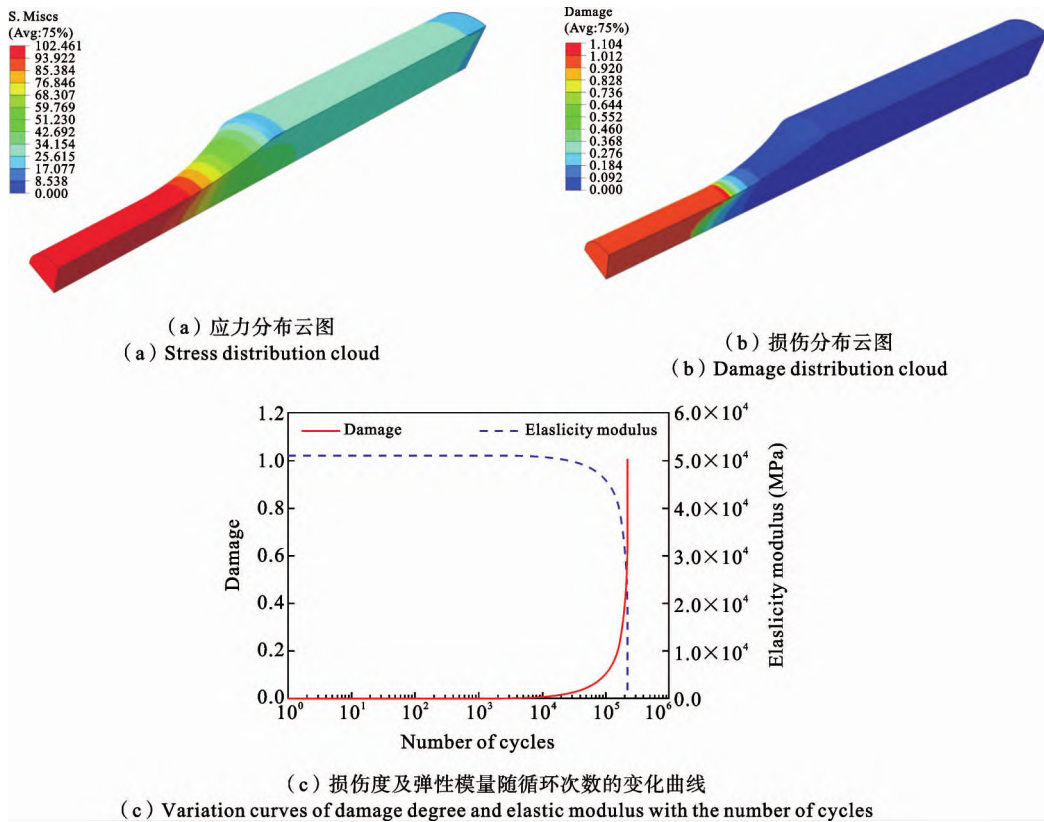


图 6 增材制造方向为 V 向,循环载荷为 $\sigma_m = 100$ MPa, $\sigma_a = 45$ MPa 情况下

Fig. 6 For the case of V-direction of the additive manufacturing, the cyclic load $\sigma_m = 100$ MPa, $\sigma_a = 45$ MPa

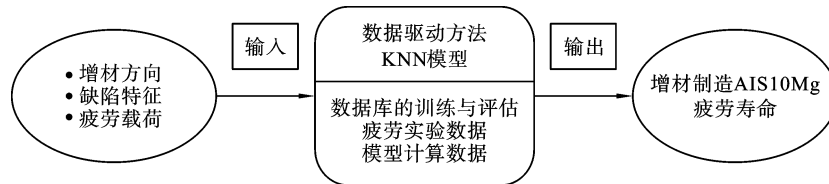


图 7 基于数据驱动的增材制造 AlSi10Mg 的疲劳寿命预测流程图

Fig. 7 Data-driven fatigue life prediction flowchart forAM AlSi10Mg

一化处理,将各分量变换到相同范围,一般为[0, 1]或[-1, 1].

选择合适的邻域参数 K ,一般而言, K 的值通常被设定为一个相对较小的整数值,进而计算预测的疲劳数据与增材制造 AlSi10Mg 的疲劳数据集中的相关数据之间的距离参量,这里选取欧氏距离为度量标准,如下式所示:

$$D(x, p) = \sqrt{(x - p)^2} \quad (17)$$

其中, x 代表查询点, p 代表数据库中的一个数据点.

基于计算的欧氏距离,选取 K 个最接近的数据点,将 K 近邻结果的平均值^[35]作为 KNN 算法的预测结果:

$$\hat{y}_i = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k y_i \quad (18)$$

其中, y_i 是数据库中的第 i 个样本数据, \hat{y}_i 是相应的预测结果.

3.2 模型数据库与预测性能评价指标

采用 2.3 节相同的增材制造 AlSi10Mg 试样进行计算,在不同的循环载荷(应力均值和应力幅值)

作用下,针对于不同的增材工艺方向,得到增材制造 AlSi10Mg 的疲劳寿命. 为了达到可接受的均衡预测性能,对输入数据进行归一化处理,使所有输入和输出的数据变化范围在 0 到 1 之间. 进而采用基于 KNN 算法的数据驱动模型对增材制造 AlSi10Mg 的疲劳数据库进行训练和预测.

对于数据驱动模型的预测准确性评价,通常采用决定系数(R^2)和^[36]平均绝对百分比误差 MAPE 作^[37]为主要评价指标,按照下式 14 和 15 计算. R^2 越接近于 1,MAPE 越接近于 1,整体预测误差越小,预测结果就越准确. MAPE 对相对误差比较敏感,并且不会因目标变量的整体缩放而改变.

$$R^2(y, \hat{y}_i) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2} \quad (19)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \quad (20)$$

其中, \hat{y}_i 代表第 i 个预测疲劳寿命值; y_i 代表第 i 个疲劳试验数据; y_m 代表 n 个疲劳寿命的平均值.

4 结果与讨论

4.1 疲劳寿命预测结果

在不同增材制造方向、不同载荷水平下,对增材制造 AlSi10Mg 的数据库开展训练. 数据集的数据总数为 200,训练集、验证集的数据数分别为 160、

40. KNN 模型的参数 K 值为 3,进而采用训练好的 KNN 模型进行预测,将预测的 AlSi10Mg 疲劳寿命与文献[9]中的试验数据进行对比,如图 8 所示,误差分析图如图 9(a)所示. 可以看到,对于 H 向增材制造的 AlSi10Mg,最大预测误差为 32.19%,对于 V 向增材制造的 AlSi10Mg,最大预测误差为 12.85%,所有的预测寿命均处在试验结果的二倍误差带以内,KNN 模型的整体预测性能评价指标如图 9(b)所示,两种增材制造方向的 R^2 都在 0.9 以上,且 MAPE 均小于 0.2,表明了该 KNN 模型具有较为不错的预测效果. 此外,可以看到,无论是针对个体,还是整体预测性能,V 向增材制造的 AlSi10Mg 的预测效果更好. 上述分析验证了所提方法的适用性.

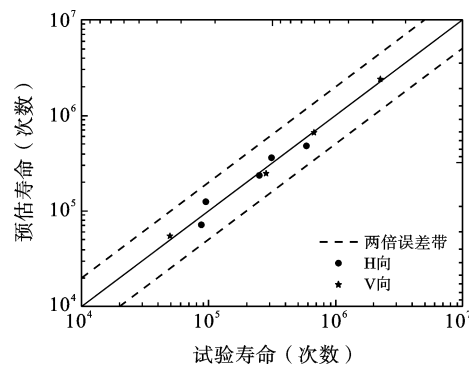
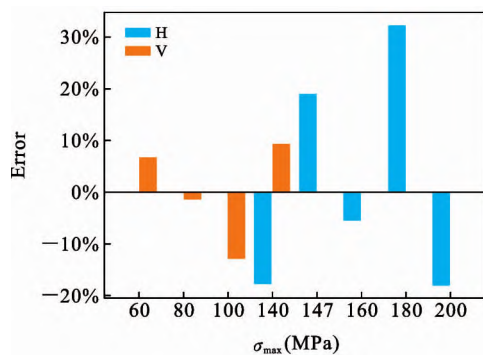
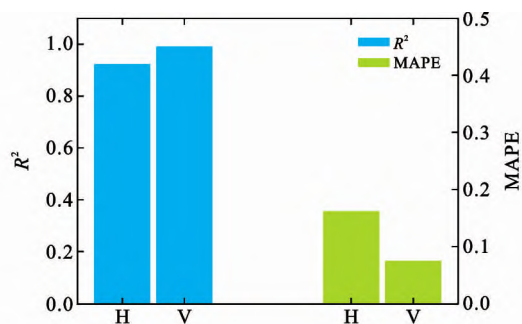


图 8 增材制造 AlSi10Mg 的预测寿命与试验数据的对比

Fig. 8 Predicted lifetime of AM AlSi10Mg against experimental data



(a) 疲劳寿命误差分析
(a) Error analysis of the fatigue lifetime



(b) 整体预测评价指标
(b) Evaluation indexes of the overall prediction performance

图 9 增材制造 AlSi10Mg 的预测结果

Fig. 9 The predicted results of AM AlSi10Mg

4.2 分析与讨论

(1) 疲劳寿命随缺陷尺寸参数 $\sqrt{\text{area}}$ ，椭圆的长宽比参数 AR 的变化规律. 对于 H 向, $\sigma_m = 180$ MPa, $\sigma_a = 81$ MPa, $l = 219.62$, $1.5 \leq AR \leq 4.3$, $53 \leq \sqrt{\text{area}} \leq 225$; 对于 V 向, $\sigma_m = 100$ MPa, $\sigma_a = 45$ MPa, $l = 553.42$, $1 \leq AR \leq 3.2$, $240 \leq \sqrt{\text{area}} \leq 586$. H 向和 V 向增材制造 AlSi10Mg 疲劳寿命的变化曲面图如图 10 所示. 可以看到, 对于不同的增材工艺方向, AlSi10Mg 疲劳寿命的总体变化趋势一致,

即疲劳寿命都随着缺陷尺寸参数和椭圆的长宽比参数的增大而降低. 对于 H 向而言, 当 $150 \leq \sqrt{\text{area}} \leq 225$ 时, 疲劳寿命随 AR 的变化规律不明显, 当 $53 \leq \sqrt{\text{area}} \leq 150$ 时, 疲劳寿命随 AR 的减小而显著增加. 对于 V 向而言, 当 $2.5 \leq AR \leq 3.2$ 时, 疲劳寿命随 $\sqrt{\text{area}}$ 的变化规律不明显, 当 $1 \leq AR \leq 2.5$ 时, 疲劳寿命随 $\sqrt{\text{area}}$ 的增加而显著降低. 因此, 在进行材料/结构的抗疲劳设计时, 需仔细考虑由增材工艺所导致的较小缺陷对疲劳损伤的影响.

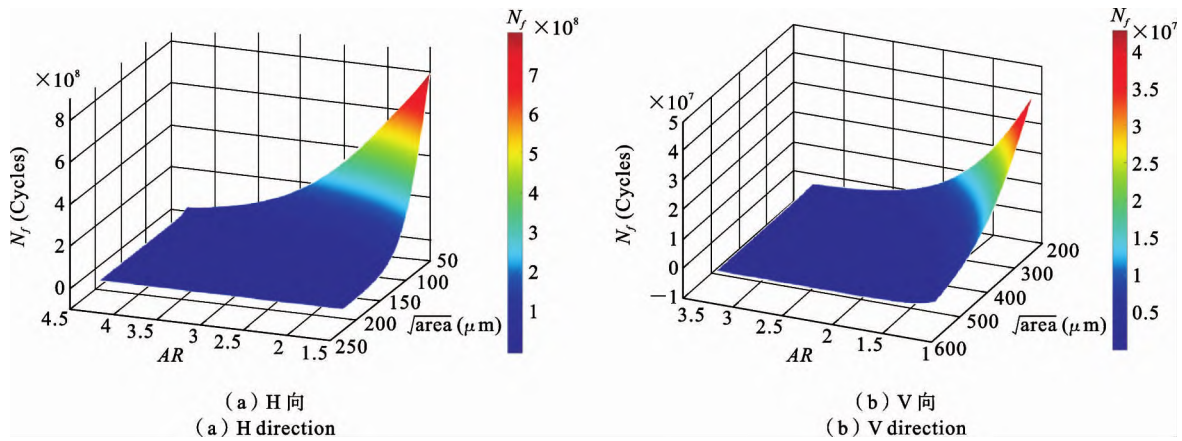


图 10 增材制造 AlSi10Mg 疲劳寿命随缺陷尺寸参数和椭圆的长宽比参数的变化曲面图

Fig. 10 Surface plot of fatigue life of AM AlSi10Mg with defect size parameter and ellipse aspect ratio parameters

(2) 疲劳寿命随最大应力 σ_{max} 和应力比 R 的变化规律. 对于 H 向, $l = 219.62$, $AR = 2.9$, $\sqrt{\text{area}} = 139, 140$ MPa $\leq \sigma_{\text{max}} \leq 200$ MPa, $0.02 \leq R \leq 0.6$; 对

于 V 向, $l = 553.42$, $AR = 2.1$, $\sqrt{\text{area}} = 413, 60$ MPa $\leq \sigma_{\text{max}} \leq 140$ MPa, $0.02 \leq R \leq 0.6$. H 向和 V 向增材制造 AlSi10Mg 疲劳寿命的变化曲面图如图 11 所

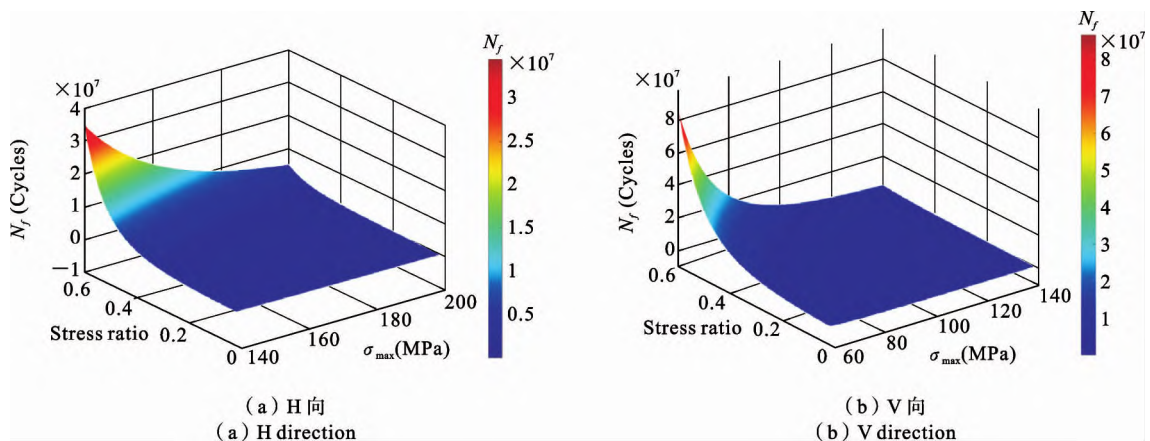


图 11 增材制造 AlSi10Mg 疲劳寿命随最大应力和应力比的变化曲面图

Fig. 11 Surface plot of fatigue life of AM AlSi10Mg with maximum stress and stress ratio

示. 可以看到, 对于不同的增材工艺方向, AlSi10Mg 疲劳寿命的总体变化趋势一致, 即疲劳寿命都随着最大应力的增大而降低, 随着应力比的增大而增加. 对于 H 向而言, 当 $180 \text{ MPa} \leq \sigma_{\max} \leq 200 \text{ MPa}$ 时, 疲劳寿命随 R 的变化规律不明显, 当 $140 \text{ MPa} \leq \sigma_{\max} \leq 180 \text{ MPa}$ 时, 疲劳寿命随 R 的增大而显著增加. 对于 V 向而言, 当 $0.02 \leq R \leq 0.3$ 时, 疲劳寿命随 σ_{\max} 的变化规律不明显, 当 $0.3 \leq R \leq 0.6$ 时, 疲劳寿命随 σ_{\max} 的增加而显著降低.

(3) 增材制造 AlSi10Mg 疲劳寿命的预测精度随训练数据量及参数 K 的变化规律如图 12 所示,

结果表明, 对于不同的增材工艺方向, 预测精度的总体变化趋势一致, 即预测精度都随着数据量的增大而提高, 当数据量达到 200 后, 预测精度无明显变化. 另一方面, 参数 K 的变化对决定系数 R^2 的影响不明显, 但是对 V 向的平均绝对百分比误差 MAPE 有一定影响. 此外, V 向的整体预测结果要优于 H 向的预测结果. H 向预测精度相对较低的主要原因在于其疲劳试验数据的分散性较大, 对疲劳损伤模型的参数标定及数值计算结果的准确性有一定影响, 而数值计算得到的疲劳寿命是模型数据库的重要组成部分, 数据库的质量影响了模型的预测精度.

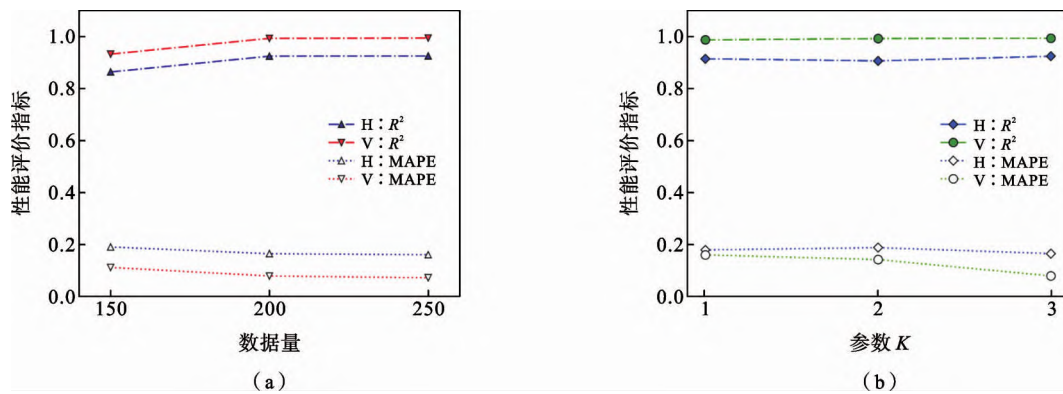


图 12 (a) 预测精度随数据量的变化规律; (b) 预测精度随参数 K 的变化规律

Fig. 12 (a) Variation of prediction accuracy with the amount of data; (b) Variation of prediction accuracy with the parameter K

5 结论

本文基于数据驱动模型, 开展了增材制造 Al-Si10Mg 的疲劳损伤分析及寿命预测. 考虑到疲劳试验数据的有限性, 采用经过试验验证的可靠的理论模型和数值计算方法来获取足够的疲劳数据, 主要结论如下:

(1) 提出了基于缺陷特征参数的疲劳损伤模型, 通过引入缺陷尺寸参数, 椭圆的长宽比参数, 以及从缺陷中心点到表面的最短距离参数, 可以合理地反映内部缺陷对增材制造金属材料损伤演化及疲劳寿命的影响.

(2) 建立了理论模型的数值实现方法, 并将数值计算结果与试验结果进行对比, 验证了所提模型

及数值方法的可靠性. 对于不同的增材工艺方向, 计算了不同循环载荷作用下的增材制造 AlSi10Mg 的疲劳寿命, 建立了数据驱动模型的数据库. 基于所提方法, 预测了增材制造 AlSi10Mg 的疲劳寿命, 所有的预测寿命均处在试验结果的二倍误差带以内, 验证了所提方法的适用性.

(3) 计算结果表明, 疲劳寿命随着缺陷尺寸参数和椭圆的长宽比参数的增大而降低, 随着最大应力的增大而降低, 随着应力比的增大而增加. 增材制造 AlSi10Mg 的疲劳损伤对较小的循环载荷和较高的应力比、增材工艺所导致的较小缺陷更为敏感, 在开展材料/结构的抗疲劳设计需仔细分析. 预测精度随着训练数据量的增大而提高, 增材制造 V 向的整体预测结果要优于 H 向的预测结果.

参考文献

- [1] 王磊, 卢秉恒. 我国增材制造技术与产业发展研究[J/OL]. 中国工程科学: 1-10[2022-07-01]. (Wang L, Lu B H. Research on additive manufacturing technology and industrial development in china[J/OL]. China Engineering Science: 1-10[2022-07-01]. (in Chinese))
- [2] 廉艳平, 王潘丁, 高杰, 刘继凯, 李取浩, 刘长猛, 贺小帆, 高亮, 李好, 雷红帅, 李会民, 肖登宝, 郭旭, 方岱宁. 金属增材制造若干关键力学问题研究进展[J]. 力学进展, 2021, 51(03): 648-701. (Lian Y P, Wang P D, Gao J, Liu J K, Li Q H, Liu C M, He X F, Gao L, Li H, Lei H S, Li H M, Xiao D B, Guo X, Fang D N. Research progress on some key mechanical problems of metal additive manufacturing[J]. Mechanical Progress, 2021, 51(03): 648-701. (in Chinese))
- [3] 杨冰, 廖贞, 吴圣川, 肖守讷, 阳光武, 朱涛, 王明猛, 邓永权. 增材制造技术发展和在先进轨道交通装备中的应用展望[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(01): 132-153. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.01.006. (Yang B, Liao Z, Wu S C, Xiao S N, Yang G W, Zhu T, Wang M M, Deng Y Q. The development of additive manufacturing technology and its application prospect in advanced rail transit equipment[J]. Journal of Transportation Engineering, 2021, 21(01): 132-153. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.01.006. (in Chinese))
- [4] Fatemi A, Molaei R, Phan N. Multiaxial fatigue of additive manufactured metals: Performance, analysis, and applications[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 134: 105479.
- [5] Komarasamy M, Shukla S, Williams S, Kandasamy K, Kelly S, Mishra R S. Microstructure, fatigue, and impact toughness properties of additively manufactured nickel alloy 718[J]. Additive Manufacturing, 2019, 28: 661-675.
- [6] Romano S, Brückner-Foit A, Brandão A, Gumpinger J, Ghidini T, Beretta S. Fatigue properties of Al-Si10Mg obtained by additive manufacturing: Defect-based modelling and prediction of fatigue strength [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 187: 165-189.
- [7] Carneiro L, Jalalahmadi B, Ashtekar A, Jiang Y. Cyclic deformation and fatigue behavior of additively manufactured 17-4 PH stainless steel[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 123: 22-30.
- [8] Yamashita Y, Murakami T, Mihara R, Okada M, Murakami Y. Defect analysis and fatigue design basis for Ni-based superalloy 718 manufactured by selective laser melting[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 117: 485-495.
- [9] Peng X, Wu S, Qian W, Bao J, Hu Y, Zhan Z, Guo G, Withers P J. The potency of defects on fatigue of additively manufactured metals [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 221: 107185.
- [10] Wu Z, Wu S, Bao J, Qian W, Karabal S, Sun W, Withers P J. The effect of defect population on the anisotropic fatigue resistance of AlSi10Mg alloy fabricated by laser powder bed fusion[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 151: 106317.
- [11] Qian W, Wu S, Wu Z, Ahmed S, Zhang W, Qian G, Withers P J. In situ X-ray imaging of fatigue crack growth from multiple defects in additively manufactured AlSi10Mg alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 155: 106616.
- [12] Niu X, Zhu S, He J, Liao D, Correia J A F O, Berto F, Wang Q. Defect tolerant fatigue assessment of AM materials: Size effect and probabilistic prospects[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 160: 106884.
- [13] 朱继宏, 曹吟锋, 翟星玥, 艾德·穆尼, 张卫红. 增材制造 316 钢高周疲劳性能的微观力学研究[J]. 力学学报, 2021, 53(12): 3181-3189. (Zhu J H, Cao Y F, Zhai X Y, ed Mooney, Zhang W H. Micromechanical study on high cycle fatigue properties of 316 steel made of additive[J]. Chinese Journal of Mechanics, 2021, 53(12): 3181-3189. (in Chinese))
- [14] 王英玉, 董星亮, 龚帅, 姚卫星. 塑性区对增材制造 316L 多轴缺口疲劳影响研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(01): 140-149. DOI: 10.16356/j.1005-2615.2022.01.016. (Wang Y Y, Dong X L, Gong S, Yao W X. Study on the effect of plastic zone on the fatigue of 316L multiaxial notch made of additive[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics

- and *Astronautics*, 2022, 54 (01): 140-149. DOI: 10.16356/j.1005-2615.2022.01.016. (in Chinese))
- [15] 肖来荣, 谭威, 刘黎明, 涂晓萱, 彭振武, 王欢, 赵小军. 激光增材制造 GH3536 合金的低周疲劳行为[J]. *中国激光*, 2021, 48(22): 87-97. (Xiao L R, Tan W, Liu L M, Tu X X, Peng Z W, Wang H, Zhao X J. Low cycle fatigue behavior of GH3536 alloy fabricated by laser additive[J]. *China Laser*, 2021, 48 (22): 87-97. (in Chinese))
- [16] 易敏, 常珂, 梁晨光, 周留成, 杨阳玮, 易新, 胥柏香. 增材制造微结构演化及疲劳分散性计算[J]. *力学学报*, 2021, 53(12): 3263-3273. (Yi M, Chang K, Liang C G, Zhou L C, Yang Y W, Yi X, Xu B X. Microstructure evolution and fatigue dispersion calculation of additive manufacturing[J]. *Chinese Journal of Mechanics*, 2021, 53(12): 3263-3273. (in Chinese))
- [17] Wang X, He X, Wang T, Li Y. Internal pores in DED Ti-6.5 Al-2Zr-Mo-V alloy and their influence on crack initiation and fatigue life in the mid-life regime [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 28: 373-393.
- [18] Liu B, Wang K, Bao R, Sui F. The effects of α/β phase interfaces on fatigue crack deflections in additively manufactured titanium alloy: A peridynamic study[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 137: 105622.
- [19] Liao D, Zhu S P, Qian G. Multiaxial fatigue analysis of notched components using combined critical plane and critical distance approach[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 160: 38-50.
- [20] Xue L, Shang D, Li D, Li L, Liu X, Chen H. Equivalent energy-based critical plane fatigue damage parameter for multiaxial LCF under variable amplitude loading [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 131: 105350.
- [21] Carrara P, Ambati M, Alessi R, De Lorenzis L. A framework to model the fatigue behavior of brittle materials based on a variational phase-field approach [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, 361: 112731.
- [22] Huang J, Meng Q, Zhan Z, Hu W, Shen F. Damage mechanics-based approach to studying effects of overload on fatigue life of notched specimens[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2019, 28(4): 538-565.
- [23] Marques F, Correia J A F O, de Jesus A M P, Cunha A, Caetano E, Fernandes A A. Fatigue analysis of a railway bridge based on fracture mechanics and local modelling of riveted connections [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2018, 94: 121-144.
- [24] Yang J, Kang G, Kan Q. A novel deep learning approach of multiaxial fatigue life-prediction with a self-attention mechanism characterizing the effects of loading history and varying temperature[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022: 106851.
- [25] Yang J, Kang G, Liu Y, Kan Q. A novel method of multiaxial fatigue life prediction based on deep learning [J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 151: 106356.
- [26] Murakami S. *Continuum Damage Mechanics: A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture*[M]. Springer, 2012.
- [27] Lemaitre J, Rodrigue D. *Engineering Damage Mechanics*[M]. Springer, 2005.
- [28] Chaboche J L. On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratchetting effects[J]. *International Journal of Plasticity*, 1991, 7(7): 661-678.
- [29] Xiao Y C, Li S, Gao Z. A continuum damage mechanics model for high cycle fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 1998, 20(7): 503-508.
- [30] Wang X, Meng Q, Hu W. Continuum damage mechanics-based model for the fatigue analysis of welded joints considering the effects of size and position of inner pores[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 139: 105749.
- [31] Yang S, Hu W, Li J, Meng Q, Zhan Z. Fatigue tests and damage model development on Al-Si-Mg aluminum alloys with low-velocity impact pit[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 153: 106466.
- [32] Gao T, Tong Y, Zhan Z, Mei W, Hu W, Meng Q. Development of a non-local approach for life prediction of notched specimen considering stress/strain gradient and elastic-plastic fatigue damage[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2022, 31(7): 1057-1081.
- [33] Ao Li, Hu W P, Zhan Z X, Meng Q C. A novel con-

- tinuum damage mechanics-based approach for thermal corrosion fatigue (TCF) life prediction of aluminum alloys[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 163: 107065.
- [34] Poul A K, Shourian M, Ebrahimi H. A comparative study of MLR, KNN, ANN and ANFIS models with wavelet transform in monthly stream flow prediction [J]. *Water Resources Management*, 2019, 33 (8): 2907-2923.
- [35] Fan G, Guo Y, Zheng J, Hong W. Application of the weighted K-nearest neighbor algorithm for short-term load forecasting[J]. *Energies*, 2019, 12(5): 916.
- [36] Zhang Y, Yang X, Shardt Y, Cui J, Tong C. A KPI-based probabilistic soft sensor development approach that maximizes the coefficient of determination [J]. *Sensors*, 2018, 18(9).
- [37] Lu H, Ma X, Ma M, Zhu S. Energy price prediction using data-driven models: A decade review[J]. *Computer Science Review*, 2021, 39: 100356.

Data-driven Fatigue Life Prediction of Additively Manufactured Aluminum Alloys

Zhixin Zhan¹ Tongzhou Gao¹ Chuanqi Liu² Shengchuan Wu³

(¹ School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing, 100191)

(² State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100090)

(³ State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

Abstract The fatigue damage and life prediction of additively manufactured metal materials are a hot topic of current research. In practical applications, fatigue damage is a typical failure mode of additively manufactured metallic materials and structures, which are often subjected to cyclic loading. Therefore, in order to improve the safety and reliability of additively manufactured metallic components in service, it is necessary to study their fatigue damage and life prediction methods. In this paper, the fatigue life prediction is carried out using a data-driven approach with the typical application of additively manufactured Al-Si10Mg. Considering the limited fatigue test data, a reliable theoretical model and a numerical method verified by experiments are used to obtain sufficient fatigue data. First, based on the damage mechanics theory, a fatigue damage model based on the defect characteristic parameters is proposed. The model can reasonably reflect the influence of internal defects on the damage evolution and fatigue life of the additively manufactured metal by introducing the parameters of defect size, ellipse aspect ratio, and the shortest distance from the defect center to the surface. The material parameters of the damage-coupled elastic-plastic constitutive model and the defect characteristics-based fatigue damage model are calibrated in conjunction with the static tensile and fatigue tests of the additively manufactured AlSi10Mg. Second, the numerical implementation of the theoretical model is established, and the numerical results are compared with the test results to verify the reliability of the proposed method. For different directions of the additive process, the fatigue lives of additively manufactured AlSi10Mg under different cyclic loads are computed, and the results are used as a database for the data-driven model along with the experimental data. Then, the training and prediction of the data-driven model are carried out, and the fatigue life of the additively manufactured AlSi10Mg is predicted by the K-nearest neighbor (KNN) algorithm. Finally, the laws of variation of fatigue life with the internal defects occurring in the additive manufacturing process and fatigue loading are analyzed in depth, and the influences of the number of training data and parameters of data-driven model on the prediction accuracy are studied.

Key words data-driven, additive manufacturing, aluminum alloys, fatigue, life prediction