

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5181

# Ti4822 钛铝合金超声疲劳尺寸效应研究

郑 严<sup>1,2,3,4</sup>, 梅金娜<sup>1,2</sup>, 朱 斌<sup>1</sup>, 蔡 振<sup>1</sup>

(1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004; 2. 国家核电厂安全及可靠性工程技术研究中心, 江苏 苏州 215004; 3. 天津大学化工学院, 天津 300350; 4. 广西防城港核电有限公司, 广西 防城港 538001)

**摘 要:**通过 3 种不同尺寸试样(平行段直径 2、3 和 5 mm)的高温超声疲劳试验,研究了 Ti4822 合金典型服役温度(650 °C)下的疲劳尺寸效应,并基于高应力体积理论,提出了 Ti4822 合金高温超高周疲劳(VHCF)极限的预测方法,分析了 Ti4822 合金的裂纹萌生起裂机制。研究表明,Ti4822 高温 VHCF 极限受到尺寸效应的影响,疲劳极限随试样平行段直径的增大而减小;提出的 Ti4822 合金高温 VHCF 极限预测方法可以预测拟合范围内的疲劳极限,并且可能适用于 Ti4822 合金其他温度下 VHCF 极限的预测;Ti4822 合金裂纹起裂机制包含非金属夹杂物滑移起裂和晶界滑移起裂两种,裂纹起裂点随应力的减小从试样表面向内部移动。

**关键词:**钛铝合金;超声疲劳;尺寸效应;Ti4822

中图分类号: TG146

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)12-1186-08

## Study of the Size Effect of Ultrasonic Fatigue in Ti4822 TiAl Alloy

ZHENG Yan<sup>1,2,3,4</sup>, MEI Jinna<sup>1,2</sup>, ZHU Bin<sup>1</sup>, CAI Zhen<sup>1</sup>

(1. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China; 2. National Engineering Research Center of Nuclear Power Plant Safety & Reliability, Suzhou 215004, China; 3. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 4. Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang 538001, China)

**Abstract:** The effect of the fatigue size of a Ti4822 alloy under typical service temperatures (650 °C) was investigated through high-temperature ultrasonic fatigue experiments on three types of samples with different parallel segment diameters (2, 3, and 5 mm). A method for predicting the high-temperature very high cycle fatigue (VHCF) limit of Ti4822 alloy was proposed on the basis of the highly stressed volume theory. The crack initiation mechanisms of typical fatigue samples were also analysed. The results indicate that the high-temperature VHCF limit of Ti4822 is influenced by the size effect, with the diameter of the parallel segment of the sample increasing, leading to a decrease in the VHCF limit. The proposed method for predicting the high-temperature VHCF limit of Ti4822 alloys could predict the fatigue limit within the fitting range and might be applicable for predicting the VHCF limit of Ti4822 alloys at other temperatures. The crack initiation mechanics of the Ti4822 alloy include two types: nonmetallic inclusion slip initiation and grain boundary slip initiation, and the crack initiation location moves from the surface toward the internal region as the stress decreases.

**Key words:** TiAl alloy; ultrasonic fatigue; size effect; Ti4822 alloy

随着新型航空航天飞行器性能的不不断提升,轻质耐高温结构件向结构复杂化、服役条件严苛化方向发展,对其服役性能要求逐步提高。钛铝合金凭借优异的高温强度、抗蠕变性、抗氧化性和阻燃性,加之低密度和高比刚度特性,有望成为航空、航天和汽车工业新一代高温结构材料<sup>[1-6]</sup>。Ti-48Al-2Cr-2Nb (Ti4822, 原子分数,%)作为第二代典型钛铝合金,凭借其所含的 Cr、Nb 元素,在承温能力和高温力学性

能方面获得了显著提升<sup>[7-10]</sup>。Ti4822 合金广泛应用于航空发动机和燃气轮机叶片材料。而飞机机身、航空发动机和燃气轮机涡轮盘及叶片由于严苛的服役条件,在服役期间往往伴随着各种失效问题,尤其是疲劳断裂<sup>[11-13]</sup>,且通常因较高的振动频率,需要超长循环周次的服役寿命,循环次数常超过  $10^7$ ,属于超高周疲劳失效问题。因此,对 Ti4822 合金在典型工作温度下超高周疲劳性能的研究具有重要工程意义。

收稿日期: 2025-08-20

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3702602);江苏省卓越博士后计划(2025ZB131);江苏省青年科技人才托举工程(JSTJ-2025-563)

作者简介: 郑 严,1995 年生,博士,工程师。主要从事断裂力学及结构完整性评定技术研究工作。Email: Yanz1028@163.com

通信作者: 梅金娜,1981 年生,博士,正高级工程师。主要从事材料服役行为评价与寿命预测技术研究工作。Email: mei.jinna@qq.com

引用格式: 郑严,梅金娜,朱斌,蔡振. Ti4822 钛铝合金超声疲劳尺寸效应研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(12): 1186-1193.

ZHENG Y, MEI J N, ZHU B, CAI Z. Study of the size effect of ultrasonic fatigue in Ti4822 TiAl alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(12): 1186-1193.

在基于实验室试样确定实际结构疲劳性能的过程中,由于实验室试样与实际结构在尺寸上存在差异,二者的疲劳性能可能因尺寸效应产生显著偏差。因此,为了将实验室试样疲劳性能应用于实际结构,有必要对 Ti4822 合金疲劳尺寸效应展开研究。

尺寸效应本质上是试样或结构尺寸对材料性能的影响。在疲劳尺寸效应问题上,众多学者对不同材料和结构展开了研究<sup>[13-18]</sup>。为解决试样和实际结构件疲劳强度的差异,Kuguel<sup>[14]</sup>提出了高应力体积法,该方法将不同尺寸试样或结构的疲劳强度与高应力体积相关联,可实现不同高应力体积下疲劳强度的相互转化。随后,高应力面积法、高应力节点法,以及基于能量的高应力体积法相继提出<sup>[15-18]</sup>。Qian 等<sup>[19]</sup>建立了最弱链概率模型来综合考虑载荷范围、加载周次与试样尺寸的协同效应对材料疲劳性能的影响,该模型揭示了载荷范围与加载次数的复合参数,参数特征与疲劳应力-寿命曲线的经验公式相似,且与累积失效概率及试样尺寸的复合参数存在显著相关性,然而该模型未讨论载荷类型对疲劳寿命的影响。El Khoukhi 等<sup>[20]</sup>针对铸铝合金展开了铸造缺陷对疲劳强度尺寸效应敏感性研究,结果表明具有高孔隙密度和较大尺寸缺陷群的合金,其疲劳强度无明显尺寸效应且离散度较小;而具有低孔隙密度和较小尺寸缺陷群的合金则表现出明显的尺寸效应和较大的离散度。Furuya<sup>[21]</sup>对比了两种试样类型在超高周疲劳(very high cycle fatigue, VHCF)性能上的差异,研究结果显示试样的 VHCF 强度随试样尺寸的增大而降低。多数内部断裂源为氧化物型夹杂物,且较大尺寸试样中的夹杂物尺寸大于标准试样。Nakajima 等<sup>[22]</sup>采用旋转弯曲与轴向载荷的超高周疲劳测试研究了加载条件对次表面裂纹的影响,研究表明轴向载荷下的疲劳寿命明显短于旋转弯曲载荷;且两种加载条件下,由非金属夹杂物引发的裂纹起始最大开裂强度( $K_{max}$ )均随疲劳寿命增加而降低,几乎不受加载方式影响。徐犇等<sup>[23]</sup>采用旋转弯曲和轴向拉压两种加载方式,研究了试样尺寸和载荷类型对 EA4T 车轴钢疲劳性能的影响,基于高应力体积、Weibull 理论及应力梯度理论对疲劳性能进行分析预测,研究结果表明,轴向拉压加载条件下的疲劳性能低于旋转弯曲下的结果,且疲劳强度随试样尺寸的增大而减小。罗忠等<sup>[24]</sup>采用 Lundberg-Palmgren 理论,研究了大型轴承疲劳寿命的尺寸效应问题,结果显示大型轴承疲劳的尺寸效应随接触角的增大而增大,且与沟曲率系数负相关。

在 Ti4822 合金疲劳性能研究方面,钟斌等<sup>[25]</sup>探

讨了铸造 Ti4822 合金在 400~800 °C 循环温度下的同相位热机械低周疲劳行为。Dahar 等<sup>[26-27]</sup>针对 Ti4822 合金室温下疲劳裂纹扩展及断裂行为,系统研究了载荷比对疲劳阈值、Paris 公式斜率及过载应力强度的影响,并记录了试样取向对疲劳裂纹路径及形貌特征的作用,研究结果显示载荷比变化对疲劳阈值和 Paris 公式斜率具有显著影响,而试样取向对 Ti4822 合金的影响均微乎其微。Zhou 等<sup>[28]</sup>对采用双丝定向能量沉积-电弧(TW-DED-arc)工艺制备的具有等轴片状晶粒结构的增材 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金进行了常温疲劳试验,并探讨了其疲劳断裂特征与变形模式。研究显示 TW-DED-arc 工艺制备的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金呈现平坦的 S-N 曲线,具有良好的抗疲劳性能。Zhou 等<sup>[29]</sup>对采用 TW-DED-arc 工艺制造的 Ti4822 合金在 650 °C 下的疲劳性能进行了系统测试,并研究了增材 Ti4822 合金的断裂特征与变形机制,研究结果显示增材 Ti4822 合金脆性-延性转变温度(ductile-brittle transition temperature, DBTT)约为 850 °C,650~950 °C 区间内,变形机制转向机械孪晶与位错滑移。Recina 等<sup>[30]</sup>对两种不同尺寸的 Ti4822 合金棒材在 600 °C 下的低周疲劳寿命特性进行了分析,研究结果表明,在相同非弹性应变幅值下,较薄棒材表现出更长的疲劳寿命;在应力控制的疲劳条件下,较厚棒材的疲劳寿命更长;双相微观结构 Ti4822 合金的疲劳寿命基本由裂纹萌生阶段决定。

尺寸效应对不同材料和结构的疲劳性能均产生不同程度的影响。Ti4822 合金虽已在航空工业广泛应用,但其疲劳性能研究主要集中于低周疲劳,疲劳尺寸效应研究极少,超高周疲劳及超高周疲劳尺寸效应研究仍为空白领域,基于高应力体积理论的超高周疲劳极限预测方法尚未发展,疲劳裂纹萌生机制也尚未厘清。对此,本文采用国产自研超声疲劳实验装置进行不同尺寸 Ti4822 合金试样的典型服役温度(650 °C)下的疲劳试验,分析试样尺寸对 VHCF 极限和 S-N 曲线的影响,并基于高应力体积理论发展 Ti4822 合金 VHCF 极限预测方法。最后,采用 SEM 对典型疲劳试样断口进行形貌表征,分析不同疲劳周次和应力水平下的断口形貌和 Ti4822 合金的裂纹萌生起裂机制。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

实验材料为铸造 Ti4822 合金,其成分如表 1 所示。Ti4822 合金在典型服役温度(650 °C)下的密度  $\rho$  和弹性模量  $E$  分别为 3.85 g/cm<sup>3</sup> 和 156 GPa。使用腐蚀

表 1 Ti4822 合金材料组分  
Tab.1 The material composition of the Ti4822 alloy  
(atomic fraction/%)

| Ti   | Al    | Cr   | Nb   | Fe    | C     | O     | N     | H     |
|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bal. | 47.56 | 2.10 | 2.05 | 0.014 | 0.016 | 0.098 | 0.014 | 0.035 |

液(氢氟酸:硝酸:水=5:10:85)对实验材料进行金相腐蚀,并基于研究级倒置万能材料显微镜(OM,Axi Observer A3)开展金相实验,结果如图 1 所示,分别为 200 倍 OM 图像(图 1a)及 500 倍局部放大图像(图 1b),可以看出,本文采用的铸态 Ti4822 合金呈现近片层组织,由  $\alpha_2+\gamma$  片层团和  $\gamma$  晶粒组成。

## 1.2 实验方法

疲劳试样取自圆柱状 Ti4822 铸锭。基于 ANSYS 模态分析设计了 3 种不同尺寸的狗骨状试样,并采

用国产自研超声疲劳试验机(杭州嘉振超声波科技有限公司,HC-XDF2020GD-03)进行高温疲劳试验,研究尺寸效应对 Ti4822 合金疲劳性能的影响。疲劳试样几何形状示意图如图 2 所示。图中, $L_1$ 、 $R_1$  分别为平行段(谐振长度)半长和半径, $L_2$ 、 $R$  分别为过渡段长度和曲面半径, $L_3$ 、 $R_2$  分别为圆柱段长度和半径,具体试样尺寸信息如表 2 所示。基于超声疲劳试验机对不同尺寸试样在不同振幅(应力)条件下开展疲劳试验,试验参数矩阵如表 3 所示。该超声疲劳试验机工作频率为  $(20\pm 0.5)$  kHz,可进行常温试验,也可基于高频感应加热模块进行高温试验,加热模块控温精度为  $\pm 5$  °C。试验前,所有试样均经过纵向抛光工艺处理,试样表面粗糙度小于  $0.2\ \mu\text{m}$ ,以降低试样表面粗糙度对试验结果的影响。采用不同尺寸疲劳

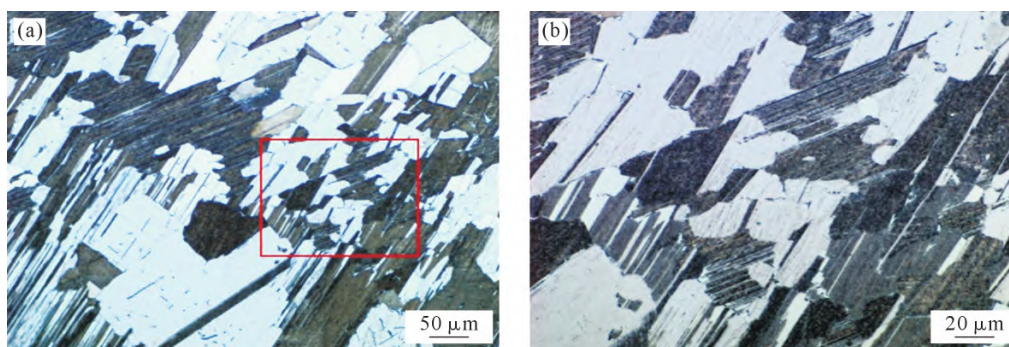


图 1 铸态 Ti4822 合金的金相 OM 图:(a) 200 倍;(b) 局部放大图

Fig.1 OM images of the as-cast Ti4822 alloy: (a) 200x; (b) partial magnification

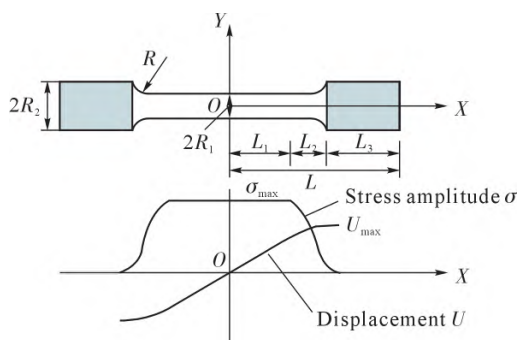


图 2 疲劳试样几何形状示意图

Fig.2 Diagram of the fatigue sample

表 2 试样尺寸  
Tab.2 Specimen size

| No. | $2R_1/\text{mm}$ | $2R_2/\text{mm}$ | $R/\text{mm}$ | $L_1/\text{mm}$ | $L_2/\text{mm}$ | $L_3/\text{mm}$ |
|-----|------------------|------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1   | 2.0              | 7.0              | 21.25         | 5.0             | 10.0            | 18.08           |
| 2   | 3.0              | 10.0             | 16.04         | 5.0             | 10.0            | 19.71           |
| 3   | 5.0              | 10.0             | 30.05         | 5.0             | 12.0            | 37.95           |

表 3 疲劳试验参数矩阵  
Tab.3 Fatigue test parameter matrix

| No. | $2R_1$<br>/mm | Amplitude<br>range/ $\mu\text{m}$ | Test<br>temperature/ $^{\circ}\text{C}$ | Loading<br>frequency/kHz | Stress<br>ratio |
|-----|---------------|-----------------------------------|---|--------------------------|-----------------|
| 1   | 2             | 20~35                             | 650                                     | 20                       | -1              |
| 2   | 3             | 23~40                             | 650                                     | 20                       | -1              |
| 3   | 5             | 30~50                             | 650                                     | 20                       | -1              |

试样在高温 ( $650\ ^{\circ}\text{C}$ ) 条件下加载不同振幅以获得  $S-N$  曲线数据点;通过经校准的高精度光纤激光测振仪实时测量试样在疲劳加载过程中的频率和底端位移,确保试验结果的准确性。试验后,采用扫描电子显微镜(SEM, ZEISS Sigma 300)对典型试样断口形貌进行微观表征,以研究疲劳试验过程中疲劳裂纹的萌生、扩展和失效断裂。

## 1.3 振幅-应力转化方法

由于超声疲劳试验机加载频率远超传统液压疲劳加载方式,因此无法采用直接测量的方法获取试验过程中试样的应力值。在超声疲劳试验条件下,狗骨状疲劳试样最大应力幅  $\sigma_{\max}$  和试样底端位移  $U_0$  关系满足式(1~7)<sup>[31]</sup>:

$$\sigma_{\max} = E\beta k \varphi(L_1, L_2, L_3)U_0 \quad (1)$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - k^2} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{L_2} \operatorname{arccosh}\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (3)$$

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (4)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (6)$$



$$\varphi(L_1, L_2, L_3) = \frac{\cos(kL_3)\cosh(L_2)}{\beta\sin(kL_1)\cosh(\beta L_2) + k\cos(kL_1)\sinh(\beta L_2)} \quad (7)$$

式中,  $E$  为材料弹性模量;  $c$  为谐振波在材料中的传播速率;  $\rho$  为材料密度;  $f$  为谐振频率;  $\omega$  为谐振角速率;  $k$  为单位长度内谐振波的周期数;  $\alpha$  和  $\beta$  均为试样尺寸系数;  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  分别为平行段(谐振长度)半长、过渡段长度和圆柱段长度。

基于式(1~7), 通过试样的材料性能、尺寸及实际测得的底端位移计算超声疲劳实验过程中试样的最大应力幅值。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 尺寸效应对 Ti4822 合金高温疲劳性能的影响

不同尺寸 Ti4822 合金疲劳试样高温  $S-N$  曲线趋势如图 3 所示。从图中可以观察到基于不同尺寸疲劳试样获得的  $S-N$  曲线总体趋势基本一致, 符合典型超高周疲劳  $S-N$  曲线特征。在  $10^6$  循环周次以下, 试样疲劳寿命与最大应力幅呈现线性关联, 试样疲劳寿命随应力幅的降低而增加; 在  $10^6 \sim 5 \times 10^7$  循环周次范围内,  $S-N$  曲线出现平台区; 未失效试样用向右的箭头标示, 表明试样疲劳寿命大于数据点的疲劳循环周次。不同尺寸疲劳试样的  $S-N$  曲线数据

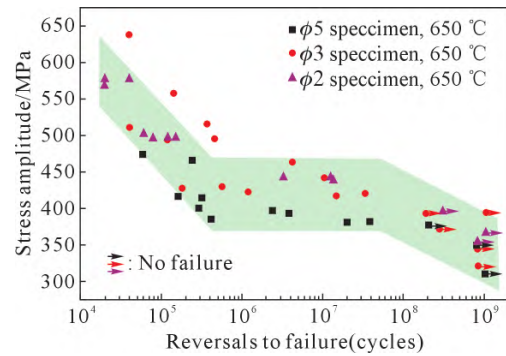


图 3 Ti4822 合金疲劳试样  $S-N$  曲线趋势示意图  
Fig.3 Schematic diagram of the  $S-N$  curves of the Ti4822 alloy fatigue test samples

呈现较大的分散性, 这可能与高温试验条件对材料内部结构和组织更敏感的特性有关。

图 4 为不同直径( $2R_1$ )Ti4822 合金疲劳试样高温  $S-N$  曲线。由图可知, 试样尺寸对 Ti4822 合金高温  $S-N$  曲线产生明显影响。随试样平行段直径的增大,  $S-N$  曲线呈现下降趋势(图 4d), 表现出显著的尺寸效应现象, 即试样疲劳强度随试样尺寸的增大而减小, 这与 Furuya 等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。对于平行段  $\phi 5$  的试样, 其  $S-N$  曲线明显低于平行段  $\phi 3$ (图 4a)和平行段  $\phi 2$ (图 4b)试样的  $S-N$  曲线。在超声疲劳条件下, 为了保证试样发生谐振, 难以控制试样单

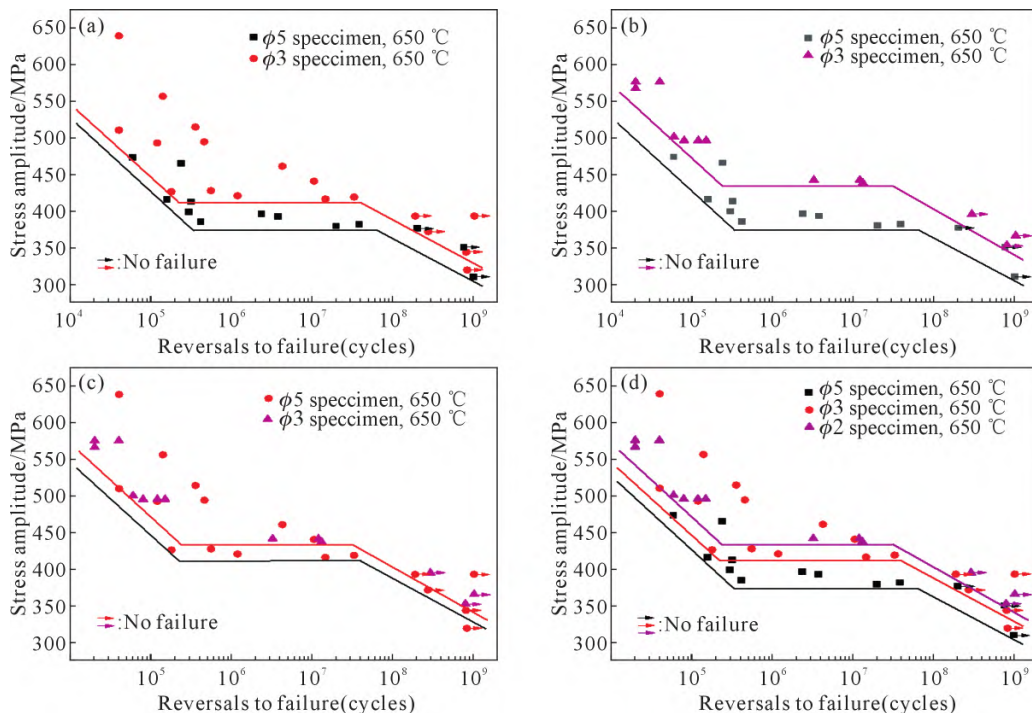


图 4 不同直径( $2R_1$ )Ti4822 合金疲劳试样高温(650 °C)  $S-N$  曲线:(a) 平行段直径  $\phi 5$  与  $\phi 3$  试样  $S-N$  曲线对比;(b) 平行段直径  $\phi 5$  与  $\phi 2$  试样  $S-N$  曲线对比;(c) 平行段直径  $\phi 3$  与  $\phi 2$  试样  $S-N$  曲线对比;(d) 平行段直径  $\phi 5$ 、 $\phi 3$  与  $\phi 2$  试样  $S-N$  曲线对比  
Fig.4 High-temperature (650 °C)  $S-N$  curves for Ti4822 alloy fatigue test samples with different diameters ( $2R_1$ ): (a) comparison of  $S-N$  curves for samples with diameters of  $\phi 5$  and  $\phi 2$ ; (b) comparison of  $S-N$  curves for samples with diameters of  $\phi 5$  and  $\phi 2$ ; (c) comparison of  $S-N$  curves for samples with diameters of  $\phi 3$  and  $\phi 2$ ; (d) comparison of  $S-N$  curves for samples with diameters of  $\phi 5$ ,  $\phi 3$  and  $\phi 2$

一尺寸变化,而平行段  $\phi 2$  试样圆柱段直径( $2R_2$ )相比于平行段  $\phi 3$  试样较小,且两种试样的平行段直径较为接近,导致了两种试样的  $S-N$  曲线(图 4c)较为接近。

在  $10^7$  疲劳周次对应的应力水平下,不同尺寸疲劳试样均发生断裂失效,进一步降低加载应力,最大疲劳周次可达  $10^8$  以上,且试样均未发生断裂失效,也未产生使得谐振频率偏移到最大范围外的内部裂纹。因此,将每种试样  $10^7$  疲劳周次下的最低应力幅定义为新的超高周疲劳极限  $\sigma_{\text{limit}}$ 。不同试样的疲劳极限如表 4 所示。

表4 不同尺寸试样的超高周疲劳极限  
Tab.4 Very high cycle fatigue limits of samples of different sizes

| $2R_1/\text{mm}$ | $\sigma_{\text{limit}}/\text{MPa}$ |
|------------------|------------------------------------|
| 2                | 438                                |
| 3                | 416                                |
| 5                | 379                                |

为了解决试样和实际结构件疲劳强度的差异,Kuguel<sup>[14]</sup>提出了高应力体积法,该方法可基于高应力体积实现参考试样和实际构件之间疲劳性能的相互转化,转化关系如下式所示:

$$\frac{\sigma_{\text{limit1}}}{\sigma_{\text{limit2}}} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\theta} \quad (8)$$

式中,  $\sigma_{\text{limit1}}$  和  $V_1$  为参考试样的疲劳极限和高应力体积;  $\sigma_{\text{limit2}}$  和  $V_2$  为待预测试样或结构的疲劳极限和高应力体积;  $\theta$  为关联系数。

本文疲劳实验中的试样均为等截面圆形试样,在轴向拉压的疲劳载荷作用下,相同面积的截面内所受应力相同,即等截面圆形试样的高应力体积可视为截面积最小的试样平行段的体积,因此,高应力体积转化关系可作如下表达:

$$\frac{\sigma_{\text{limit1}}}{\sigma_{\text{limit2}}} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\theta} = \left( \frac{\pi r_2^2 L_2}{\pi r_1^2 L_1} \right)^{\theta} \quad (9)$$

式中,  $r_1$  和  $r_2$  分别为两个不同等截面圆形试样的平行段半径;  $L_1$  和  $L_2$  分别为两个不同等截面圆形试样的平行段长度。本文中所有试样的平行段长度(10 mm)相同,即:

$$\frac{\sigma_{\text{limit1}}}{\sigma_{\text{limit2}}} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\theta} = \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{-2\theta} \quad (10)$$

不同尺寸试样之间的高应力体积比( $V_2/V_1$ )、半径比( $r_1/r_2$ )及其对应的疲劳极限比( $\sigma_{\text{limit1}}/\sigma_{\text{limit2}}$ )如表 5 所示。

根据表 5 中的数据拟合式(10)关系曲线,结果如图 5 所示,可以看出拟合曲线离散性较低,数据拟

表 5 不同尺寸试样的高应力体积比、半径比及疲劳极限比  
Tab.5 Highly stressed volume ratio, radius ratio and fatigue limit ratio of samples with different sizes

| $V_2/V_1$ | $r_1/r_2$ | $\sigma_{\text{limit1}}/\sigma_{\text{limit2}}$ |
|-----------|-----------|---|
| 6.25      | 0.40      | 1.16  |
| 2.78      | 0.60      | 1.10  |
| 2.23      | 0.67      | 1.05  |
| 0.44      | 1.50      | 0.95  |
| 0.36      | 1.67      | 0.91  |
| 0.16      | 2.50      | 0.87  |

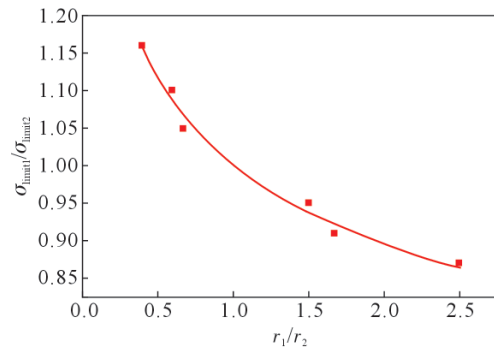


图 5 Ti4822 合金超高周疲劳极限预测曲线拟合  
Fig.5 Prediction curve fitting for very high cycle fatigue limits of the Ti4822 alloy

合良好,获得拟合曲线:

$$\frac{\sigma_{\text{limit1}}}{\sigma_{\text{limit2}}} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{0.079} = \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{-0.159} \quad (11)$$

式(11)适用的高应力体积比  $V_2/V_1$  范围为 0.16~6.25,仅能向内插值计算。采用实验数据结果与拟合值差值与拟合值的百分比来表征拟合结果的离散度,结果如表 6 所示,可以看出,拟合曲线离散度最大为 1.48%,显示出拟合数据范围内预测结果的高准确性和低离散性。

表6 拟合曲线离散度数值  
Tab.6 Fitting curve dispersion values

| $r_1/r_2$ | Fitting dispersion |
|-----------|--------------------|
| 0.40      | 0.27%              |
| 0.60      | 1.42%              |
| 0.67      | 1.48%              |
| 1.50      | 1.33%              |
| 1.67      | 1.27%              |
| 2.50      | 0.64%              |

对于典型服役温度(650 °C)下的 Ti4822 合金,可根据式(11),基于已知超高周疲劳极限  $\sigma_{\text{limit1}}$  和平行段半径  $r_1$ (或高应力体积  $V_1$ )的参考试样预测其他试样或结构的超高周疲劳极限。由于疲劳极限与材料性能相关,疲劳极限相比的计算过程或许消除了材料性能的影响。且超高周疲劳加载应力远低于材料的屈服应力,疲劳加载过程中弹性变形占主导地位,而不同温度下 Ti4822 合金的弹性模量差异较



小,这使得式(9)可能适用于其他温度下 Ti4822 合金超高周疲劳极限的预测。

## 2.2 Ti4822 疲劳裂纹起裂机制分析

图 6 为不同尺寸试样的超声疲劳断口形貌,包括断口全局形貌以及裂纹起裂位置局部放大图像,图中白色虚线椭圆框表示裂纹起裂源位置。可以看出,在较高应力水平下,试样的超声疲劳失效循环周次  $N_f$  较低,对于  $N_f$  较低的试样( $N_f < 10^5$ ),断口呈现

多个起裂源,且起裂源均位于试样表面(图 6a 和 f)。对于同种试样,随着试样内部应力水平的降低,起裂源位置由试样表面向试样内部移动(图 6a~d)。在较低应力水平下(约 440 MPa),试样断口呈现单一起裂源特征,起裂源位置往往位于试样次表面。

基于 Ti4822 合金典型试样疲劳断口形貌分析,揭示了 Ti4822 合金的两种裂纹萌生模式。其一是非金属夹杂物滑移起裂裂纹萌生模式,在图 6b 中可以

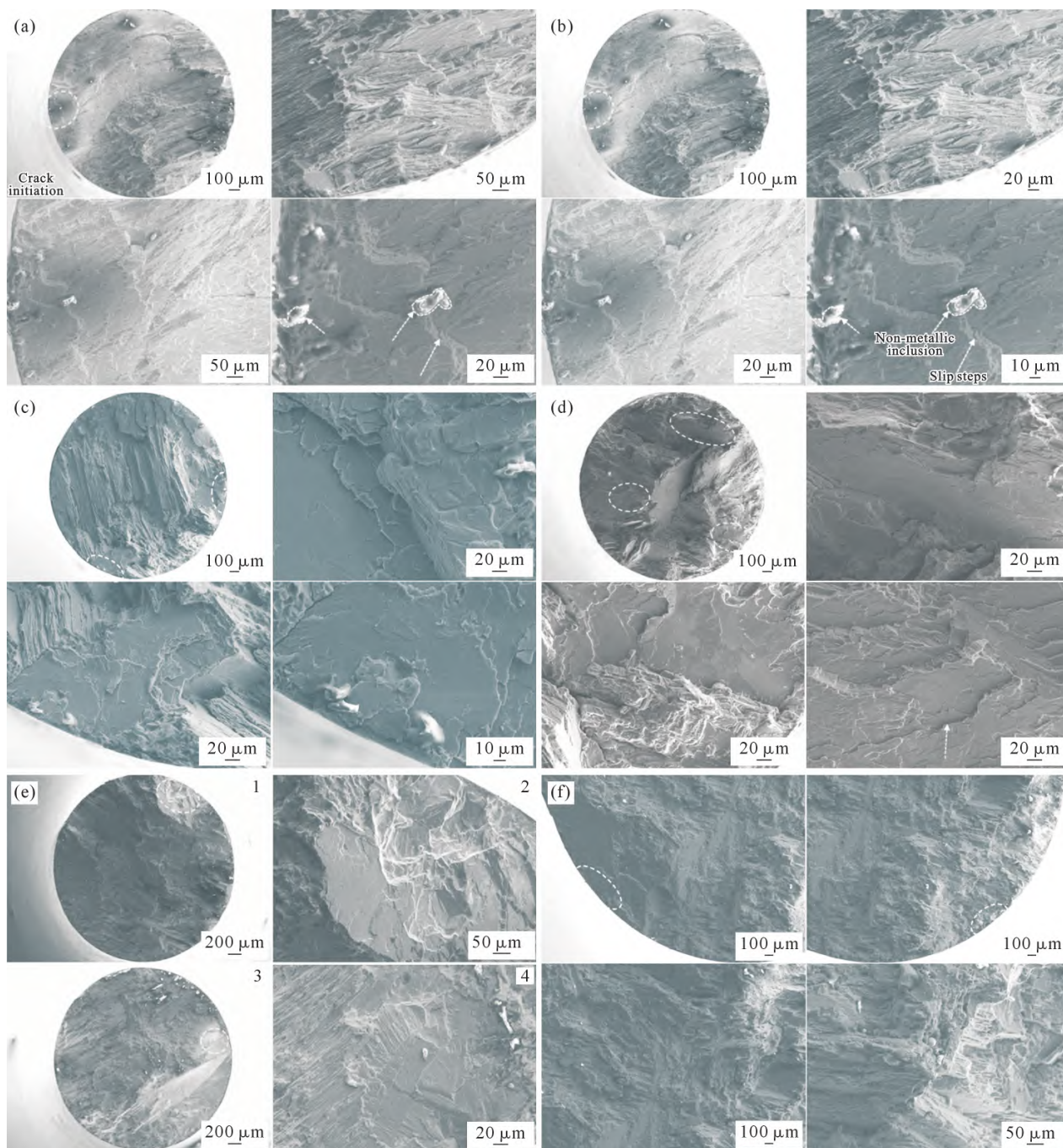


图 6 不同尺寸试样超声疲劳断口形貌:(a)  $2R_1=2$  mm,  $\sigma=576$  MPa,  $N_f=4\times 10^4$ ; (b)  $2R_1=2$  mm,  $\sigma=496$  MPa,  $N_f=1.5\times 10^5$ ; (c)  $2R_1=2$  mm,  $\sigma=442$  MPa,  $N_f=3.3\times 10^6$ ; (d)  $2R_1=2$  mm,  $\sigma=438$  MPa,  $N_f=1.3\times 10^7$ ; (e)  $2R_1=3$  mm,  $\sigma=557$  MPa,  $N_f=1.4\times 10^5$  (1 和 2) 和  $2R_1=3$  mm,  $\sigma=441$  MPa,  $N_f=1.1\times 10^7$  (3 和 4); (f)  $2R_1=5$  mm,  $\sigma=473$  MPa,  $N_f=6\times 10^4$

Fig.6 Ultrasonic fatigue fracture morphology of samples of different sizes: (a)  $2R_1=2$  mm,  $\sigma=576$  MPa,  $N_f=4\times 10^4$ ; (b)  $2R_1=2$  mm,  $\sigma=496$  MPa,  $N_f=1.5\times 10^5$ ; (c)  $2R_1=2$  mm,  $\sigma=442$  MPa,  $N_f=3.3\times 10^6$ ; (d)  $2R_1=2$  mm,  $\sigma=438$  MPa,  $N_f=1.3\times 10^7$ ; (e)  $2R_1=3$  mm,  $\sigma=557$  MPa,  $N_f=1.4\times 10^5$  (1 and 2) and  $2R_1=3$  mm,  $\sigma=441$  MPa,  $N_f=1.1\times 10^7$  (3 and 4); (f)  $2R_1=5$  mm,  $\sigma=473$  MPa,  $N_f=6\times 10^4$

观察到典型的非金属夹杂物析出相,在析出相附近呈现一片明显的光学暗区,同时存在滑移台阶,更外围呈现明亮的河流状条纹。另外,该部分区域呈现出光滑特征,没有明显的高度差。河流状条纹的出现说明断裂从起裂源向四周延伸,是疲劳断裂的重要特征之一。非金属夹杂物硬质相阻止了位错的连续滑移并导致局部应力集中,随后滑移转化为微裂纹,在高频振动疲劳作用下微裂纹迅速扩展,形成更大的扩展区域。其二是典型的晶界滑移起裂裂纹萌生模式,从图 6d 中可以看出,在起裂源位置未观察到较大的非金属夹杂物析出相,起裂源为大面积的滑移面,滑移面与加载应力方向约成  $45^\circ$  倾斜角,且在滑移面上出现明显台阶条纹,多个大角度的滑移面汇聚与轴向应力共同作用,使得断面形貌呈现较大的高度差。位错在滑移方向上运动形成滑移带,部分经过晶界的连续滑移带被晶界阻挡,导致这部分滑移带和晶界交汇区域产生位错的局部累积,然后局部应力集中导致微裂纹在应力集中程度更高的晶界附近开始萌生和扩展。

### 3 结论

(1) Ti4822 合金的高温  $S-N$  曲线随试样平行段直径( $2R_1$ )的增大而向下移动,即疲劳强度随试样尺寸的增大而下降,呈现典型疲劳尺寸效应。

(2) 基于高应力体积法提出的 Ti4822 合金超高周疲劳极限预测方法与实验数据呈现低离散度(最大为 1.48%),可在拟合范围内准确预测试样或结构的高温( $650^\circ\text{C}$ )超高周疲劳极限。由于预测方法的计算过程消除了材料性能的影响,并且超高周疲劳弹性变形占主导地位,而温度对 Ti4822 合金弹性模量的影响较小,因此所提出的预测方法可能适用于 Ti4822 合金其他温度下的超高周疲劳极限预测。

(3) 基于 SEM 断口分析发现 Ti4822 合金具备非金属夹杂物滑移和晶界滑移两种典型疲劳裂纹起裂模式;随着试样应力水平的降低, Ti4822 合金疲劳起裂源位置逐渐从试样表面向内部移动。

#### 参考文献:

- [1] 杨锐. 钛铝金属间化合物的进展与挑战[J]. 金属学报, 2015, 51(2): 129-147.  
YANG R. Advances and challenges of TiAl base alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(2): 129-147.
- [2] 陈玉勇, 孔凡涛. TiAl 基金属新材料研究及精密成形[J]. 金属学报, 2002(11): 1141-1148.  
CHEN Y Y, KONG F T. Research on TiAl based alloys materials

- and precision forming[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002(11): 1141-1148.
- [3] CHEN G, PENG Y B, ZHENG G, QI Z X, WANG M Z, YU H C, DONG C L, LIU C T. Polysynthetic twinned TiAl single crystals for high-temperature applications[J]. Nature Materials, 2016, 15: 876-881.
- [4] ATTAR H, EHEMAM-HAGHIGHI S, KENT D, DARGUSCH M S. Recent developments and opportunities in additive manufacturing of titanium based matrix composites: A review[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2018, 133: 85-102.
- [5] 邵启航, 楚玉东, 陈晓飞, 卫贝贝, 马彪, 唐斌. Ti-43Al-0.5Re-xCr 合金高温变形过程的动态再结晶行为[J]. 铸造技术, 2025, 46(4): 316-324.  
SHAO Q H, CHU Y D, CHEN X F, WEI B B, MA B, TANG B. Dynamic recrystallization behavior during thermal deformation of Ti-43Al-0.5Re-xCr alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(4): 316-324.
- [6] 卫贝贝, 马彪, 陈晓飞, 张翔, 唐斌. Ti-43Al-4Nb-1Mo-0.2B 合金多道次热轧后冷却速率对其组织演化及性能的影响[J]. 铸造技术, 2025, 46(4): 307-315.  
WEI B B, MA B, CHEN X F, ZHANG X, TANG B. Effect of the cooling rate on the microstructure evolution and properties of Ti-43Al-4Nb-1Mo-0.2B alloy after multiple pass hot rolling[J]. Foundry Technology, 2025, 46(4): 307-315.
- [7] XU R R, LI M Q, ZHAO Y H. A review of microstructure control and mechanical performance optimization of  $\gamma$ -TiAl alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 932: 167611.
- [8] XI X X, DING W F, WU Z X, ANGGEI L. Performance evaluation of creep feed grinding of  $\gamma$ -TiAl intermetallics with electroplated diamond wheels[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(6): 100-109.
- [9] 寇宏超, 程亮, 唐斌, 宋霖, 李金山. 高温 TiAl 合金热成形技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(21): 24-31.  
KOU H C, CHENG L, TANG B, SONG L, LI J S. Progress on hot-forming techniques of high temperature TiAl alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 24-31.
- [10] KIM Y K, HONG J K, LEE K A. Enhancing the creep resistance of electron beam melted gamma Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy by using two step heat treatment[J]. Intermetallics, 2020, 121: 106771.
- [11] 轩福贞, 朱明亮, 王国彪. 结构疲劳百年研究的回顾与展望[J]. 机械工程学报, 2021, 57(6): 26-51.  
XUAN F Z, ZHU M L, WANG G B. Retrospect and prospect on century-long research of structural fatigue[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(6): 26-51.
- [12] 王润梓, 廖鼎, 张显程, 朱顺鹏, 涂善东, 郭素娟. 高温结构蠕变疲劳寿命设计方法: 从材料到结构[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 66-86, 105.  
WANG R Z, LIAO D, ZHANG X C, ZHU S P, TU S T, GUO S J. Creep-fatigue life design methods in high-temperature structures: From materials to components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 66-86, 105.
- [13] HE J C, ZHU S P, GAO J W, RUI L, LI W, LIU Q, HE Y, WANG Q Y. Microstructural size effect on the notch fatigue behavior of a



- Ni-based super alloy using crystal plasticity modelling approach [J]. *International Journal of Plasticity*, 2024, 172: 103857.
- [14] KUGUEL R. A relation between theoretical stress concentration factor and fatigue notch factor deduced from the concept of highly stressed volume[J]. *American Society of Testing Materials*, 1961, 61: 732-748.
- [15] LEITNER M, VORMWALD M, REMES H. Statistical size effect on multiaxial fatigue strength of notched steel components [J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 104: 322-333.
- [16] ZHANG Y R, SU C, LIU X T. Notch-based probabilistic fatigue analysis of automobile transmission gear considering size effect[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 125: 103882.
- [17] AI Y, ZHU S P, LIAO D, CORREIA J, DE JESUS A, KESHTEGAR B. Probabilistic modelling of notch fatigue and size effect of components using highly stressed volume approach [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 127: 110-119.
- [18] PEDRANZ M, FONTANARI V, RAGHAVENDRA S, SANTUS C, ZANINI F, CARMIGNATO S, LUSUARDI D, BERTO F, BENEDETTI M. A new energy based highly stressed volume concept to investigate the notch-pores interaction in thick-walled ductile cast iron subjected to uniaxial fatigue [J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 169: 107491.
- [19] QIAN G A, LEI W S. A statistical model of fatigue failure incorporating effects of specimen size and load amplitude on fatigue life[J]. *Philosophical Magazine*, 2019, 99(17): 2089-2015.
- [20] EL KHOUKHI D, MOREL F, SAINTIER N, BELLETT D, OSMOND P, LE V D, ADRIEN J. Experimental investigation of the size effect in high cycle fatigue: Role of the defect population in cast aluminium alloys[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 129: 105222.
- [21] FURUYA Y. Notable size effects on very high cycle fatigue properties of high-strength steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(15): 5234-5240.
- [22] NAKAJIMA M, TOKAJI K, ITOGA H, SHIMIZU T. Effect of loading condition on very high cycle fatigue behavior in a high strength steel [J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32 (2): 475-480.
- [23] 徐犇,杨冰,王栓程,肖守讷,阳光武,朱涛. 尺寸效应对 EA4T 车轴钢疲劳性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(16): 137-145.
- XU B, YANG B, WANG S C, XIAO S N, YANG G W, ZHU T. Size effect on fatigue properties of EA4T axle steel [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(16): 137-145.
- [24] 罗忠,杨曜嘉,郑思佳,周吉来. 考虑尺寸效应的大型轴承疲劳寿命分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(12): 1751-1758.
- LUO Z, YANG Y J, ZHENG S J, ZHOU J L. Analysis of fatigue life of slewing bearings considering size effect [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2024, 45(12): 1751-1758.
- [25] 钟斌,焦泽辉,郑飞,马岳,苏彬. 铸造 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的热机械疲劳行为[J]. *机械强度*, 2020, 42(3): 559-564.
- ZHONG B, JIAO Z H, ZHENG F, MA Y, SU B. Thermo-mechanical fatigue (TMF) behavior of casting Ti-48Al-2Cr-2Nb inter-metallic alloy[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2020, 2(3): 559-564.
- [26] DAHAR M S, SEIFI S M, BEWLAY B P, LEWANDOWSKI J J. Effects of test orientation on fracture and fatigue crack growth behavior of third generation as-cast Ti-48Al-2Nb-2Cr[J]. *Intermetallics*, 2015, 57: 73-82.
- [27] DAHAR M S, TAMIRISAKANDALA S A, LEWANDOWSKI J J. Fatigue crack growth and fracture behavior of as-cast Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B (TNM) compared to Ti-48Al-2Nb-2Cr (4822) [J]. *Intermetallics*, 2017, 97: 158-168.
- [28] ZHOU W L, SHEN C, WANG L, ZHANG T, LI Y, XIN J W, ZHANG Y L, LI F, DING Y H, WANG K L, ZHANG D Q, HUA X M. High cycle fatigue properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured via twin-wire directed energy deposition-arc[J]. *Materials Characterization*, 2024, 218(1): 114526.
- [29] ZHOU W L, SHEN C, WANG L, LI Y, ZHANG T, XIN J W, DING Y H, ZHANG D Q, ZHANG Y L, LI F, HUA X M. High-temperature tensile and fatigue properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured via twin-wire directed energy deposition-arc[J]. *Intermetallics*, 2025, 184: 108833.
- [30] RECINA V, KARLSSON B. High temperature low cycle fatigue properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb gamma titanium aluminides cast in different dimensions[J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43(7): 609-615.
- [31] 彭文杰,吴圣川,薛欢,彭周,刘冬. 超声疲劳试样动态应变测量及应力检定方法[J]. *机械科学与技术*, 2023, 42(2): 287-293.
- PENG W J, WU S C, XUE H, PENG Z, LIU D. Measurement approach of dynamic strain and stress calibration for ultrasonic fatigue specimen [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023, 42(2): 287-293.

(责任编辑:宫文婧)