**XXX**

XX

2023-xx-xx发布 202x-xx-xx实施

**团 体 标 准**

**X XX XXXX—xxxx**

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_

**耐高温金属材料热疲劳性能**

**评价方法**

Evaluation method for thermal fatigue performance of high temperature resistant metal materials

（征求意见稿）

**山东省特种设备协会 发布**

**前 言**

为了进一步规范耐高温金属材料热疲劳性能评价方法，以规范化评价方法获取耐高温金属材料热疲劳性能，参考有关国际标准和国外先进标准，制订“耐高温金属材料热疲劳性能评价方法”标准，形成耐高温金属材料热疲劳性能评价方法的标准化、指导性文件，提高耐高温金属材料热疲劳服役性能，以实现耐高温金属材料在复杂工况条件下疲劳服役的安全性和可靠性。

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东省特种设备协会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

**目 次**

[1 范围 3](#_Toc134386093)

[2 规范性引用文件 3](#_Toc134386094)

[3 术语和定义 4](#_Toc134386095)

[4 基本规定 5](#_Toc134386096)

[5 热疲劳试样 5](#_Toc134386097)

[5.1 一般规定 5](#_Toc134386098)

[5.2 试样尺寸 5](#_Toc134386099)

[5.3 试样表面质量及位置公差 6](#_Toc134386100)

[5.4 初始微观组织调控 6](#_Toc134386101)

[6 热疲劳测试 6](#_Toc134386102)

[6.1 温度控制 6](#_Toc134386103)

[6.2 装置调节 6](#_Toc134386104)

[6.3 热疲劳实验 7](#_Toc134386105)

[7 热疲劳性能评价 7](#_Toc134386106)

[7.1 微观组织演化 7](#_Toc134386107)

[7.2 缺陷演化 7](#_Toc134386108)

[7.3 微裂纹扩展 8](#_Toc134386109)

[7.4 断裂机制 8](#_Toc134386110)

[7.5 疲劳寿命 8](#_Toc134386111)

耐高温金属材料热疲劳性能评价方法

1 范围

本标准适用于高温合金、耐热钢、难熔金属和金属间化合物结构材料等耐高温金属材料试样轴向应变和位移控制的热疲劳试验，规定了具有一定标距长度的圆形、矩形横截面试样在高温条件下热疲劳性能评价应遵守的基本守则、失效判断、评价要求。

产品构件和其他特殊形状试样的热疲劳性能评价方法可参照本标准执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 6398-2017 金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法

GB/T 33812-2017 金属材料 疲劳试验 应变控制热机械疲劳试验方法

GB/T 41154-2021 金属材料 多轴疲劳试验 轴向-扭转应变控制热机械疲劳试验方法

GB/T 37306.1-2019 金属材料 疲劳试验 变幅疲劳试验 第1部分：总则、试验方法和报告要求

GB/T 37306.2-2019 金属材料 疲劳试验 变幅疲劳试验 第2部分：循环计数和相关数据缩减方法

GB/T 38822-2020 金属材料 蠕变-疲劳试验方法

GB/T 12443-2017 金属材料 扭矩控制疲劳试验方法

GB/T 4337-2015 金属材料 疲劳试验 旋转弯曲方法

GB/Z 40387-2021 金属材料 多轴疲劳试验设计准则

GB/T 3075-2021 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法

GB/T 26077-2021 金属材料 疲劳试验 轴向应变控制方法

GB/T 15824-2008 热作模具钢热疲劳试验方法

GB/T 38250-2019 金属材料 疲劳试验机同轴度的检验

GB/T 26076-2010 金属薄板（带） 轴向力控制疲劳试验方法

GB/T 40410-2021 金属材料 多轴疲劳试验 轴向-扭转应变控制方法

GB/T 37616-2019 铝合金挤压型材轴向力控制疲劳试验方法

GB/T 24176-2009 金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法

GB/T 25917.1-2019 单轴疲劳试验系统 第1部分：动态力校准

GB/T 25917.2-2019 单轴疲劳试验系统 第2部分：动态校准装置用仪器

GB/T 15248-2008 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法

T/CFA 010604-1-2012 铸造磨球冲击疲劳寿命试验方法

ISO 12108:2018 Metallic materials — Fatigue testing — Fatigue crack growth method

ISO 12111:2011 Metallic materials — Fatigue testing — Strain-controlled thermomechanical fatigue testing method

ISO 12110-1:2013 Metallic materials — Fatigue testing — Variable amplitude fatigue testing — Part 1: General principles, test method and reporting requirements

ISO 12110-2:2013 Metallic materials — Fatigue testing — Variable amplitude fatigue testing — Part 2: Cycle counting and related data reduction methods

ISO 1143:2021 Metallic materials — Rotating bar bending fatigue testing

ISO 1352:2011 Metallic materials — Torque-controlled fatigue testing

ISO 22407:2021 Metallic materials — Fatigue testing — Axial plane bending method

3 术语和定义

3.1 高温合金 superalloy

以铁、镍、钴为基，能在600°C以上的高温及一定应力作用下长期工作的一类金属材料，具有优异的高温强度，良好的抗氧化和抗热腐蚀性能，良好的疲劳性能、断裂韧性等综合性能。

3.2 耐热钢 heat-resistant steel

在高温下具有较高的强度和良好的化学稳定性的合金钢。

3.3 难熔金属 refractory metal

常指钨、钼、铌、钽、钒、锆，也可以包括铼和铪。这类金属的特点为熔点高、硬度大、抗蚀性强，多数能同碳、氮、硅、硼等生成高熔点、高硬度并肯有良好化学稳定性的化合物。

3.4 金属间化合物 intermetallic compound

金属与金属或金属与类金属(如 H、B、N、S、P、C、Si等)形成的化合物。

3.5 轴向应变 axial strain

与外力同方向的伸长(或压缩)方向上的应变称为轴向应变。

3.6 疲劳 fatigue

材料、零件和构件在循环加载下，在某点或某些点产生局部的永久性损伤，并在一定循环次数后形成裂纹、或使裂纹进一步扩展直到完全断裂的现象。

3.7 粗糙度 roughness

加工表面具有的较小间距和微小峰谷的不平度。

3.8 平行度 Parallelism

两平面或者两直线平行的程度，指一平面（边）相对于另一平面（边）平行的误差最大允许值。

3.9 垂直度 Verticality

限制实际要素对基准在垂直方向上变动量的一项指标。

3.10 同轴度 Concentricity

表示零件上被测轴线相对于基准轴线，保持在同一真线上的状况。也就是通常所说的共轴程度。

3.11 缺陷 defect

指晶体里面的孔洞、微裂纹等缺陷。

3.12 疲劳裂纹扩展 fatigue crack growth

承受结构或元件，由于交变载荷的作用，或者由于载荷和环境侵蚀的联合作用，会产生微小的裂纹，裂纹将随着交变载荷周次的增加或环境侵蚀时间的延长而逐渐扩展。随着裂纹尺寸增大，结构或元件的剩余强度逐步减小，最后导致断裂。

4 基本规定

4.1 疲劳测试时遵循GB/T 26077-2021的要求，保证疲劳测试数据的真实性和有效性。

4.2 疲劳测试人员经过专业培训，应熟练掌握疲劳测试的操作规范，熟悉疲劳测试设备的使用要求和操作方法。

5 热疲劳试样

5.1 一般规定

为保证耐高温金属材料热疲劳测试的便捷性，本标准推荐使用圆柱形试样或矩形试样。

5.2 试样尺寸

为保证耐高温金属材料疲劳性能数据的有效性，规定除构件外，耐高温金属材料标准疲劳试样形状尺寸应满足相关规定

5.2.1 圆棒状试样标距段直径*d*为5~10 mm，标距段长度*L*=3*d*±*d*，过渡圆弧半径*r≥*2*d*。

5.2.2 矩形试样标距段厚度*t*为2.5~5 mm，标距段长度*L*=3*t*±*t*，宽度*w*=2*t*，过渡圆弧*r≥*2*w*。

5.3 试样表面质量及位置公差

5.3.1 热疲劳试验数据具有分散性，为减少试验数据精度的影响因素，需要保证热疲劳试样表面的粗糙度。热疲劳试样标距区域需要使用水砂纸从240#逐级打磨至5000#，粗糙度优于0.08。

5.3.2 试样平行度优于0.03。

5.3.3 试样垂直度优于0.03。

5.3.4 试样同轴度优于0.03。

5.4 初始微观组织调控

5.4.1 为了调控耐高温金属材料的初始微观组织，采用真空热处理工艺。

5.4.2 根据具体材料实施相应的热处理温度和保温时间。

5.4.3 采用金相显微镜表征金属材料的金相组织，包括其晶粒尺寸及分布。

5.4.4 采用扫描电子显微镜表征金属材料微观组织中微米尺度的第二相等组织特征，包括其粒径、体积含量、形貌及分布。

5.4.5 采用电子背散射衍射表征金属材料微观组织织构、取向等特征，包括Kernel average misorientation (KAM)，施密特因子(Schimid factor)及泰勒因子(Taylor factor)等。

5.4.6 采用透射电子显微镜表征金属材料微观组织中纳米尺度的第二相等组织特征，包括其粒径、体积含量、形貌及分布。

6 热疲劳测试

6.1 温度控制

6.1.1 三段控温高温炉对试件温度采用串级控制，优化温度梯度。

6.1.2 为保证疲劳试样在恒温条件下开展疲劳试验，规定温度测量位置处于疲劳试样标距段附近，温度波动范围小于± 2°C。

6.2 装置调节

6.2.1 保证热疲劳实验过程中的同轴度，疲劳机加载系统、试样台、试样夹具等部件必须精密配合，尽量消除连接件之间的间隙，能够稳定有效夹持疲劳试样，保证疲劳试样安装后同轴度优于0.08 mm。

6.2.2 为实时控制、监测热疲劳试样表面的应变演化行为，热疲劳试验装置必须配置数字图像相关装置，主要包括高速摄像机、冷光源、支架、数据检测及处理软件等。

6.2.3 为保证试验装置的稳定性与可靠性，应按照相关规定定期对疲劳机力传感器、位移传感器、高精度线性可变差动变压位移传感器、压力传感器等，进行准确度校正。

6.3 热疲劳实验

6.3.1 热疲劳实验遵循GB/T 26077-2021执行。

6.3.2 热疲劳试验机实时记录耐高温金属材料热疲劳试验过程中的应力应变，评价初始微观组织及测试条件等对热疲劳过程应力应变演化的影响。

6.3.3 通过热疲劳试验机记录的每组试样测试的疲劳寿命，构建疲劳寿命预测模型，评价热疲劳性能的优劣。

6.3.4 数字图像相关装置规定拍摄速率不少于10张/秒，用于精确评价初始微观组织及测试条件等对热疲劳过程疲劳试样表面的应变演化情况。

6.3.5 考虑到耐高温金属材料局域微观组织不均匀性的存在，每一组试验备3个平行试样，以保证试验结果的有效性和可靠性。

7 热疲劳性能评价

7.1 微观组织演化

7.1.1 为了评价耐高温金属材料热疲劳过程中微观组织的演化情况，开展热疲劳中断实验，采用扫描电子显微镜、电子背散射衍射、透射电子显微镜等从二维静态角度表征评价初始微观组织及测试条件等对金属材料热疲劳过程位错、滑移带等微观组织演化行为的影响。

7.1.2 依据合金的初始微观组织特征，通过分子动力学模拟软件LAMMPS建立合适的原子结构模型，选择适合模拟体系的势函数、系综(正则系综，微正则系综，巨正则系综，等温等压系综)及边界条件(周期性边界，非周期性边界)，并对原子结构模型进行能量最小化及弛豫处理。在模型结构稳定后，沿一定方向施加疲劳载荷，并控制应变速率及应变幅进行疲劳过程中的微观组织演化模拟，如位错密度、层错数量、孪晶数量，进行统计量化及可视化分析。

7.2 缺陷演化

7.2.1 为了评价耐高温金属材料热疲劳过程中微观孔洞缺陷演化情况，采用同步辐射X射线成像技术从三维动态角度表征评价初始微观组织及测试条件等对金属材料热疲劳过程微观孔洞演化行为的影响。

7.2.2 通过分子动力学模拟软件LAMMPS开展耐高温金属材料热疲劳过程中微观孔洞缺陷演化情况，动态显示初始微观组织及变形条件对金属材料热疲劳过程微观孔洞演化行为的影响。

7.3 微裂纹扩展

7.3.1 为了评价热疲劳过程微裂纹的扩展行为，通过辨别断裂模式和相关的变形机制，并检查热疲劳期间的裂纹路径剖面和裂纹尖端前的变形微观结构，分析热疲劳试样中裂纹路径剖面和微观结构之间的相关性，阐明热疲劳裂纹的微观结构起源。

7.3.2 通过有限元分析软件，建立三维模型，仿真计算不同载荷条件下模型的应力、应变与变形分布情况，预测疲劳过程中的最大应力与最大应变位置，采用断裂力学模型模拟裂纹在疲劳载荷下的萌生及扩展，并对裂纹扩展与疲劳寿命之间的关系进行评价和预测。

7.4 断裂机制

7.4.1 为了评价热疲劳断裂机制，通过扫描电子显微镜表征断裂面上的疲劳裂纹萌生区、裂纹扩展区和瞬断区的形貌特征，揭示微观组织及变形条件对热疲劳断裂机制的影响。

7.4.2 通过有限元分析软件，建立热疲劳三维仿真模型，动态显示不同载荷条件下热疲劳试样的应力、应变与变形分布情况，预测疲劳过程中的最大应力与最大应变位置，揭示材料的疲劳变形机制。

7.5 疲劳寿命

7.5.1 基于耐高温金属材料热疲劳寿命实验数据，分析初始微观组织和变形条件对热疲劳寿命的影响，构建考虑初始微观组织影响的热疲劳寿命预测模型，评价耐高温金属材料的疲劳寿命。

7.5.2 基于准确的有限元模型，在几何形状以及边界条件准确的三维有限元模型以及能够准确描述材料属性的本构关系的基础上根据材料和载荷类型选择适当的疲劳寿命评估法则以评价材料的疲劳寿命。