

团 体 标 准

T/ CNS 12—2019

压水堆核电厂金属材料环境疲劳影响模型

**Environmentally assisted fatigue model of metallic materials used in pressurized
water reactor nuclear power plants**

2019 - 05-27 发布

2019-09-01 实施

中国核学会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 模型数据 1

5 低合金钢 1

6 奥氏体不锈钢 4

7 镍基合金 6

8 利用环境疲劳影响模型评价压水堆核电站关键设备的疲劳损伤 8

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由中国核学会提出。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准负责起草单位：中国科学院金属研究所、上海核工程研究设计院有限公司。

本标准主要起草人：韩恩厚、谭季波、吴欣强、刘晓强、刘畅、张旭。

本标准于2019年首次发布。

压水堆核电站金属材料环境疲劳影响模型

1 范围

本标准给出了压水堆核电站低合金钢、奥氏体不锈钢和镍基合金的环境疲劳影响模型。

本标准适用于压水堆核电站一回路压力边界部件的环境疲劳设计、环境疲劳损伤评估和寿命评估。

2 规范性引用文件

下列文件对本文件的应用是必不可少的，凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修订单）适用于本文件。

T/CNS 4—2018 核电站金属材料高温高压水中腐蚀疲劳试验方法

3 术语和定义

T/CNS 4—2018 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

环境疲劳影响因子 **environmental fatigue correction factor (F_{en})**

空气中疲劳寿命与高温高压冷却剂环境中疲劳寿命的比值

4 模型数据

根据 T/CNS 4—2018 对压水堆核电站低合金钢（19MnNiMo 反应堆压力容器低合金钢锻件）、奥氏体不锈钢（022Cr17Ni12Mo2N 主管道奥氏体不锈钢锻件、022Cr19Ni10 堆内构件奥氏体不锈钢锻件）、镍基合金（NS3105 蒸汽发生器传热管及管坯）材料开展模拟高温高压一回路环境疲劳试验，获取相关试验数据作为本标准环境疲劳影响模型的输入。

5 低合金钢

5.1 低合金钢空气中疲劳设计曲线

构建低合金钢空气中疲劳模型基于简化的 Langer 方程公式（1），公式（2）为拟合疲劳数据获得的空气中的疲劳平均曲线（室温-325℃），见图 1：

$$\varepsilon_a = AN_f^{-B} + C \dots\dots\dots (1)$$

$$\varepsilon_a = 28.104N_f^{-0.544} + 0.151 \dots\dots\dots (2)$$

ε_a 为应变幅， N_f 为疲劳寿命，两边取对数得

$$\ln N_f = 6.132 - 1.838 \ln(\varepsilon_a - 0.151) \dots\dots\dots (3)$$

疲劳设计曲线是将平均曲线的应力幅（应变幅）除以 2 或者疲劳寿命除以 12 取下包络线获得。

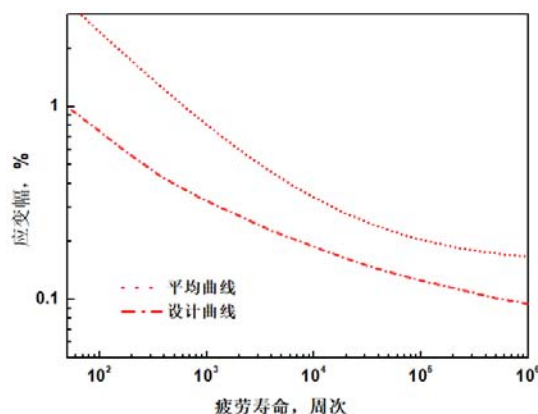


图 1 低合金钢空气中疲劳平均曲线和设计曲线

5.2 低合金钢环境疲劳影响模型

本标准中低合金钢环境疲劳影响因子构建主要考虑的要素有应变速率、温度和溶解氧（DO），S 含量（0.002%）不作为低合金钢环境疲劳影响因子构建的要素。

5.2.1 应变速率的影响

图 2 为低合金钢在 320℃、DO<10 ppb 高温高压水中 F_{en} 与应变速率的关系曲线：

$$F_{en} = 1.531\dot{\epsilon}^{-0.167} \dots\dots\dots(4)$$

其中 $\dot{\epsilon}$ 为应变速率，两边取对数获得

$$\ln F_{en} = 0.426 - 0.167 \ln \dot{\epsilon} \dots\dots\dots(5)$$

当应变速率大于 4 %s⁻¹ 时， F_{en} 为 1.21，高温高压水环境对低合金钢疲劳寿命影响较小。应变速率在 4 %s⁻¹~0.0004 %s⁻¹ 区间，疲劳寿命随应变速率降低而降低，应变速率下限阈值为 0.0004 %s⁻¹。

5.2.2 温度的影响

图 3 为低合金钢在 DO<10 ppb 高温高压水环境中，应变速率为 0.01 %s⁻¹ 时 F_{en} 与温度的关系曲线：

$$F_{en} = \exp[0.0055(T - 150)] \dots\dots\dots(6)$$

其中 T 为温度（℃），两边取对数获得

$$\ln F_{en} = 0.0055(T - 150) \dots\dots\dots(7)$$

温度低于 150℃ 时， F_{en} 为 1，高温高压水环境对疲劳寿命无影响。温度在 150~325℃ 区间，疲劳寿命随温度升高而降低。考虑压水堆核电站运行温度，温度上限阈值取 325℃。

5.2.3 DO 的影响

图 4 为低合金钢在温度为 320℃ 高温高压水环境中，应变速率为 0.01 %s⁻¹ 时 F_{en} 与 DO 的关系曲线：

$$F_{en} = 0.28DO^{0.54} \dots\dots\dots(8)$$

两边取对数获得

$$\ln F_{en} = 0.54 \ln(DO) - 1.241 \dots\dots\dots(9)$$

DO 低于 40 ppb 时, DO 对低合金钢高温高压水疲劳寿命影响较小, DO 下限阈值为 40 ppb。 DO 在 40 ppb-1000 ppb 区间, 疲劳寿命随 DO 升高而降低, DO 上限阈值为 1000 ppb。

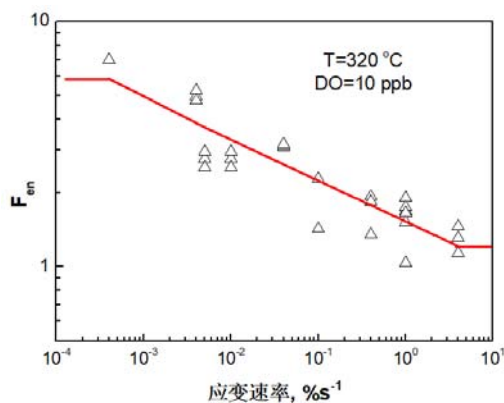


图2 低合金钢在高温高压水环境中 F_{en} 与应变速率的关系曲线

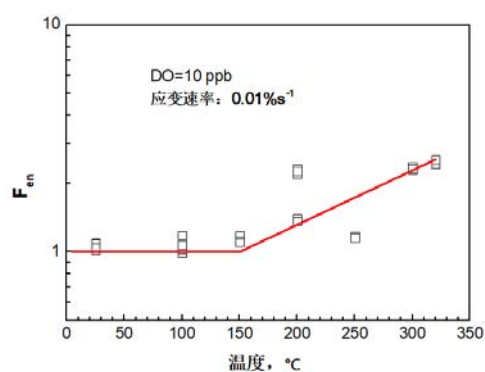


图3 低合金钢在高温高压水环境中 F_{en} 与温度的关系曲线

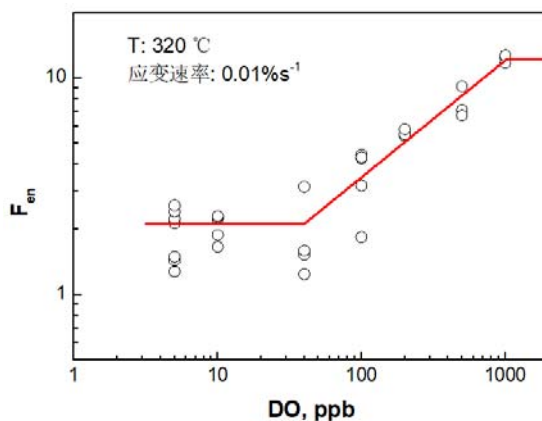


图4 低合金钢在高温高压水环境中 F_{en} 与 DO 的关系曲线

4.2.4 低合金钢环境疲劳影响模型

综合上述应变速率、温度和 DO 对 F_{en} 的影响, 获得低合金钢 (19MnNiMo) 的 F_{en} 表达式及边界条件如下:

$$\begin{aligned}
\ln F_{en} &= (2.55 - \dot{\varepsilon}^*) T^* O^* \\
\dot{\varepsilon}^* &= 1.386 \quad (\dot{\varepsilon} \geq 4\% s^{-1}) \\
\dot{\varepsilon}^* &= \ln(\dot{\varepsilon}) \quad (0.0004\% s^{-1} < \dot{\varepsilon} < 4\% s^{-1}) \\
\dot{\varepsilon}^* &= \ln(0.0004) \quad (\dot{\varepsilon} \leq 0.0004\% s^{-1}) \\
T^* &= 0 \quad (T \leq 150^\circ C) \\
T^* &= 0.000298(T - 150) \quad (150 < T < 325^\circ C) \\
T^* &= 0.0522 \quad (T \geq 325^\circ C) \\
O^* &= 1.391 \quad (DO \leq 40 \text{ ppb}) \\
O^* &= \ln(DO) - 2.298 \quad (40 < DO < 1000 \text{ ppb}) \\
O^* &= 4.61 \quad (DO \geq 1000 \text{ ppb})
\end{aligned} \tag{10}$$

其中 $\dot{\varepsilon}^*$ 为应变速率因子, T^* 为温度因子, O^* 为 DO 因子。

6 奥氏体不锈钢

6.1 奥氏体不锈钢空气中疲劳设计曲线

构建奥氏体不锈钢空气中疲劳模型基于简化的 Langer 方程公式 (1), 公式 (11) 为拟合疲劳数据获得的空气中的疲劳平均曲线 (室温-325℃), 见图 5:

$$\varepsilon_a = 23N_f^{-0.46} + 0.112 \tag{11}$$

两边取对数得

$$\ln N_f = 6.82 - 2.17 \ln(\varepsilon_a - 0.112) \tag{12}$$

疲劳设计曲线是将平均曲线的应力幅 (应变幅) 除以 2 或者疲劳寿命除以 12 取下包络线获得。

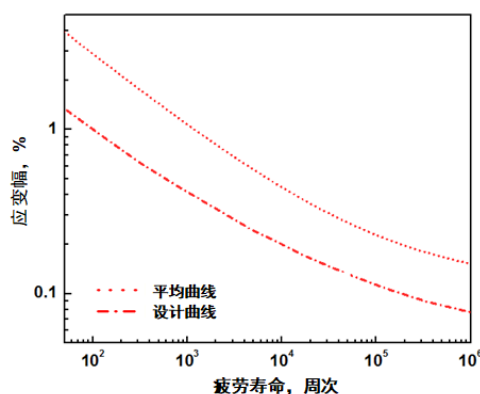


图5 奥氏体不锈钢空气中疲劳平均曲线和设计曲线

6.2 奥氏体不锈钢环境疲劳影响模型

本标准中奥氏体不锈钢环境疲劳影响因子构建主要考虑的要素有应变速率、温度和 DO。

6.2.1 应变速率的影响

图 6 为奥氏体不锈钢在 325℃、DO<10 ppb 高温高压水中 F_{en} 与应变速率的关系曲线：

$$F_{en} = 1.434\dot{\epsilon}^{-0.26} \dots\dots\dots(13)$$

两边取对数获得

$$\ln F_{en} = 0.36 - 0.26 \ln \dot{\epsilon} \dots\dots\dots(14)$$

当应变速率大于 4 %s⁻¹ 时， F_{en} 为 1，高温高压水环境对奥氏体不锈钢疲劳寿命无影响。应变速率在 4 %s⁻¹~0.0004 %s⁻¹ 区间，疲劳寿命随应变速率降低而降低，应变速率下限阈值为 0.0004 %s⁻¹。

6.2.2 温度的影响

图 7 为奥氏体不锈钢在 DO<5 ppb 高温高压水环境中，应变速率为 0.001 %s⁻¹ 时 F_{en} 与温度的关系曲线：

$$F_{en} = \exp[0.0097(T-100)] \dots\dots\dots(15)$$

两边取对数获得

$$\ln F_{en} = 0.0097(T-100) \dots\dots\dots(16)$$

温度低于 100℃ 时， F_{en} 为 1，高温高压水环境对疲劳寿命无影响。温度在 100℃~325℃ 区间，疲劳寿命随温度升高而降低。考虑压水堆核电站运行温度，温度上限阈值取 325℃。

6.2.3 DO 的影响

DO≤10 ppb 时，考虑 DO 的影响因子为 1；DO≥100 ppb 时，考虑 DO 的影响因子为 0.5。

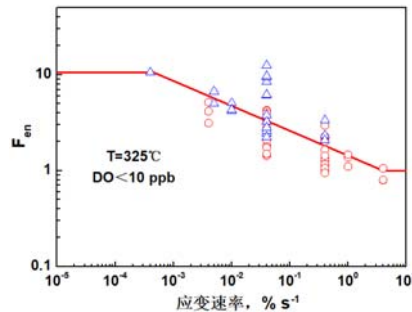


图6 奥氏体不锈钢在高温高压水环境中 F_{en} 与应变速率的关系曲线

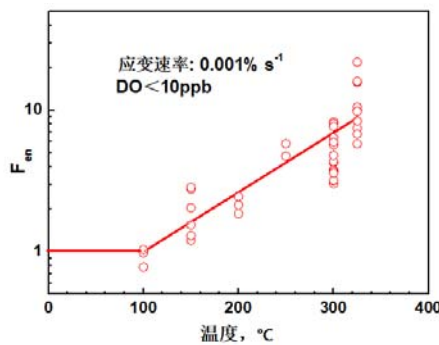


图7 奥氏体不锈钢在高温高压水环境中 F_{en} 与温度的关系曲线

6.2.4 奥氏体不锈钢环境疲劳影响模型

综合上述应变速率、温度和 DO 对 F_{en} 的影响,获得奥氏体不锈钢(022Cr17Ni12Mo2N、022Cr19Ni10)的 F_{en} 表达式及边界条件如下:

$$\begin{aligned}
 \ln F_{en} &= (1.385 - \dot{\varepsilon}^*) T^* O^* \\
 \dot{\varepsilon}^* &= \ln(4) & (\dot{\varepsilon} \geq 4\%s^{-1}) \\
 \dot{\varepsilon}^* &= \ln(\dot{\varepsilon}) & (0.0004\%s^{-1} < \dot{\varepsilon} < 4\%s^{-1}) \\
 \dot{\varepsilon}^* &= \ln(0.0004) & (\dot{\varepsilon} \leq 0.0004\%s^{-1}) \\
 T^* &= 0 & (T \leq 100^\circ C) \dots\dots\dots (17) \\
 T^* &= 0.00116(T - 100) & (100 < T < 325^\circ C) \\
 T^* &= 0.261 & (T \geq 325^\circ C) \\
 O^* &= 1 & (DO \leq 10 \text{ ppb}) \\
 O^* &= 0.5 & (DO \geq 100 \text{ ppb})
 \end{aligned}$$

7 镍基合金

7.1 镍基合金空气中疲劳设计曲线

构建镍基合金空气中疲劳模型基于简化的 Langer 方程公式(1),公式(18)为拟合疲劳数据获得的空气中的疲劳平均曲线(室温-325℃),见图8:

$$\varepsilon_a = 25.782 N_f^{-0.498} + 0.116 \dots\dots\dots (18)$$

两边取对数得

$$\ln N_f = 6.525 - 2.008 \ln(\varepsilon_a - 0.116) \dots\dots\dots (19)$$

疲劳设计曲线是将平均曲线的应力幅(应变幅)除以2或者疲劳寿命除以12取下包络线获得。

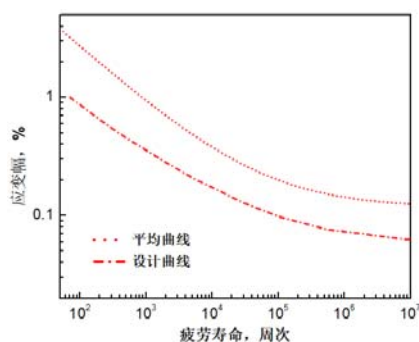


图8 镍基合金空气中疲劳平均曲线和设计曲线

7.2 镍基合金环境疲劳影响模型

本标准中镍基合金环境疲劳影响因子构建主要考虑的要素有应变速率、温度和 DO 。

7.2.1 应变速率的影响

图 9 为镍基合金在 325℃、DO<10 ppb 高温高压水中 F_{en} 与应变速率的关系曲线：

$$F_{en} = 0.992\dot{\epsilon}^{-0.156} \dots\dots\dots(20)$$

两边取对数获得

$$\ln F_{en} = -0.008 - 0.156 \ln \dot{\epsilon} \dots\dots\dots(21)$$

当应变速率大于 0.95 %s⁻¹ 时，高温高压水环境对镍基合金疲劳寿命无影响。应变速率在 0.95%s⁻¹~0.0004 %s⁻¹ 区间，疲劳寿命随应变速率降低而降低，应变速率下限阈值为 0.0004 %s⁻¹。

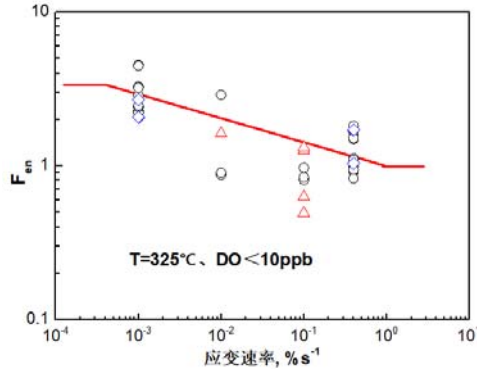


图9 镍基合金在高温高压水环境中 F_{en} 与应变速率的关系曲线

7.2.2 温度的影响

图 10 为镍基合金在 DO<10 ppb 高温高压水环境中，应变速率为 0.001 %s⁻¹ 时温度与 F_{en} 的关系曲线：

$$F_{en} = \exp[0.00407(T - 25)] \dots\dots\dots(22)$$

两边取对数获得

$$\ln F_{en} = 0.00407(T - 25) \dots\dots\dots(23)$$

温度低于 25℃ 时，高温高压水环境对疲劳寿命无影响。温度在 25℃~325℃ 区间，疲劳寿命随温度升高而降低。考虑压水堆核电站运行温度，温度上限阈值取 325℃。

7.2.3 DO 的影响

DO≤10 ppb 时，考虑 DO 的影响因子为 1；DO≥200 ppb 时，考虑 DO 的影响因子为 0.5。

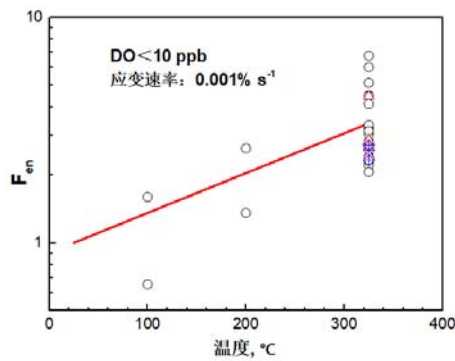


图10 镍基合金在高温高压水环境中 F_{en} 与温度的关系曲线

7.2.4 镍基合金环境疲劳影响模型

综合上述应变速率、温度和 DO 对 F_{en} 的影响, 获得镍基合金 (NS3105) 的 F_{en} 表达式及边界条件如下:

$$\begin{aligned} \ln F_{en} &= (-0.0513 - \dot{\varepsilon}^*) T^* O^* \\ \dot{\varepsilon}^* &= \ln(0.95) & (\dot{\varepsilon} \geq 0.95\% s^{-1}) \\ \dot{\varepsilon}^* &= \ln(\dot{\varepsilon}) & (0.0004\% s^{-1} < \dot{\varepsilon} < 0.95\% s^{-1}) \\ \dot{\varepsilon}^* &= \ln(0.0004) & (\dot{\varepsilon} \leq 0.0004\% s^{-1}) \dots\dots\dots(24) \\ T^* &= 0.00048T & (0 \leq T \leq 325^\circ C) \\ O^* &= 1 & (DO \leq 10 \text{ ppb}) \\ O^* &= 0.5 & (DO \geq 200 \text{ ppb}) \end{aligned}$$

8 利用环境疲劳影响模型评价压水堆核电站关键设备的疲劳损伤

8.1 空气中疲劳线性累积损伤评价

利用线性累积损伤理论评价压水堆核电站关键设备的疲劳损伤, 在空气中:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i \dots\dots\dots(25)$$

其中 U 为空气中疲劳线性累积损伤因子, U_i 为某一应变幅 (应力幅) 下的疲劳损伤因子

$$U_i = \frac{N_i}{N_{i,d}} \dots\dots\dots(26)$$

式中:

N_i ——为压水堆核电站关键设备用结构材料 (低合金钢、奥氏体不锈钢和镍基合金) 在该应变幅 (应力幅) 下遭受的循环周次;

$N_{i,d}$ ——为用环境疲劳影响模型预测压水堆核电站关键设备用结构材料在该应变幅 (应力幅) 下的疲劳寿命 (空气中)。

8.2 高温高压水环境中疲劳线性累积损伤评价

在高温高压水环境中:

$$U_{en} = \sum_{i=1}^n U_i \times F_{en} \dots\dots\dots(27)$$

式中:

U_{en} ——高温高压水中疲劳线性累积损伤因子, 如 U_{en} 大于 1, 应进入更细化的分析。