

熔盐罐罐底角焊缝疲劳可靠性评估方法及应用

俞兵¹, 胡海军¹, 谢国山^{2,3}, 李涌泉^{2,3}, 李秀峰^{2,3}

(1. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安; 2. 中国特种设备检测研究院, 100029, 北京;

3. 国家市场监督管理总局技术创新中心(炼油与化工装备风险防控), 100029, 北京)

摘要: 为了准确评估熔盐罐罐底角焊缝服役过程中的疲劳可靠性, 将应力影响因素和疲劳模型参数随机化, 提出了一种基于应力-强度干涉理论的角焊缝疲劳可靠性评估方法。通过雨流计数法获得典型的熔盐液位变化幅值并统计其出现频率; 建立了真实尺寸的角焊缝数值模型并获得其应力分布; 基于角焊缝尺寸、载荷等应力影响因素的正态分布模型, 应用拉丁超立方抽样方法对其抽样统计, 从而获得角焊缝焊趾处等效结构应力的分布模型; 对 ASME BPVC. VIII. 2—2023 标准中疲劳寿命模型的主应力-寿命曲线参数进行随机化, 基于应力-强度干涉理论, 建立了角焊缝疲劳可靠性评估模型; 对某光热装置低温熔盐罐罐底角焊缝的疲劳可靠性进行实例分析。结果表明: 一个季度内熔盐罐液位变化主要有 6 种典型工况, 最大液位波动为 1.55~12.39 m; 角焊缝最大应力位于其内侧焊趾处, 为 301.5 MPa; 多载荷下角焊缝的疲劳寿命均值为 46 a, 服役 3 a 后角焊缝的疲劳失效概率为 0.040 6, 服役 30 a 后的失效概率为 0.335 9。

关键词: 熔盐罐; 角焊缝; 应力-强度干涉模型; 疲劳可靠性

中图分类号: TK513.5 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202501020 **文章编号:** 0253-987X(2025)01-0215-10

Methodology and Application of Fatigue Reliability Assessment Fillet Welds at the Bottom of Molten Salt Tanks

YU Bing¹, HU Haijun¹, XIE Guoshan^{2,3}, LI Yongquan^{2,3}, LI Xiufeng^{2,3}

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. China Special Equipment

Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China; 3. Technology Innovation Center of Risk Prevention and

Control of Refining and Chemical Equipment, State Administration for Market Regulation, Beijing 100029, China)

Abstract: To accurately assess the fatigue reliability of fillet welds at the bottom of molten salt tanks during service, a fatigue reliability assessment method based on the stress-strength interference theory is introduced. This method involves randomizing stress-influencing factors and fatigue model parameters. The range of typical molten salt liquid level variations and their occurrence frequencies are obtained through the rainflow counting method. A numerical model of fillet welds, accurately representing their dimensions, is created to analyze stress distribution. By utilizing a normal distribution model for stress-influencing factors such as fillet weld size and load, the Latin hypercube sampling technique enables the statistical sampling necessary to establish the distribution model of equivalent structural stress at the fillet weld toe. The primary stress-life

收稿日期: 2024-06-05。 作者简介: 俞兵(1998—), 男, 硕士生; 李秀峰(通信作者), 男, 高级工程师。 基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目(2022MK200); 中国特检院内部项目(2022key03)。

网络出版时间: 2024-09-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20240919.1521.002>

curve parameters within the fatigue life model as per the ASME BPVC. VIII. 2—2023 standard is randomized. Based on the stress-strength interference theory, a fatigue reliability assessment model for fillet welds is established. An illustrative analysis of the fatigue reliability of fillet welds at the bottom of a low-temperature molten salt tank of a solar thermal device reveals six typical operational scenarios for liquid level fluctuations within a quarter, with peak variations spanning from 1.55 m to 12.39 m. The highest stress on the fillet weld is identified at the inner weld toe, measuring 301.5 MPa. The average fatigue lifespan of fillet welds subjected to various loads is calculated at 46 a. Following 3 a of service, the probability of fatigue failure of the fillet weld stands at 0.040 6, escalating to 0.335 9 after 30 a of operational service.

Keywords: molten salt tank; fillet weld; stress-strength interference model; fatigue reliability

熔盐罐是新型能源和储能系统的核心设备,在实际运行中,其内部的熔盐液位会发生周期性的升降,使罐体受到高温疲劳荷载的作用。罐底角焊缝是熔盐罐应力集中的敏感部位,在疲劳荷载作用下更容易发生开裂和泄漏,导致系统停机。研究熔盐罐角焊缝的疲劳可靠性,对于保障熔盐罐长周期安全稳定运行具有重要的意义。

目前国内外学者针对储罐装置的可靠性展开了大量研究。王丹^[1]以液氨储罐为研究对象,探究了不同因素对储罐开裂失效的影响,基于应力-强度干涉模型提出了储罐管道可靠性的评价模型。刘明等^[2]以立式低温储罐为研究对象,利用线性累积损伤理论计算分析了储罐的结构动力可靠性,得到了储罐可靠度的变化规律。Zhang 等^[3]将分层贝叶斯模型的结果与应力-强度干涉理论相结合,建立了考虑大型储罐底板厚度、半径和屈服强度等随机特性的可靠性计算模型。Choi 等^[4]针对海底大型储油罐,建立了储罐泄漏的故障树模型,并估算出海底储罐在实际运行工况下的可靠性约为 91.8%。Liu 等^[5]基于液化天然气储罐混凝土底座骨料的几何形状和分布的不确定性因素,采用蒙特卡罗方法,提出了在液重和风荷载随机作用下的可靠性评价方法。李翊等^[6]采用数值仿真方法对覆土式储罐的应力进行计算,基于仿真结果计算了储罐结构的极限强度,预测了储罐整体的可靠性。Nho 等^[7]分析了液化天然气(LNG)储罐材料属性的随机性,基于应力-寿命曲线(S-N 曲线)计算了球形 LNG 储罐的疲劳寿命,提出了泄漏前失效(LBF)概念,评价了储罐整体的疲劳可靠性。杨志华等^[8]考虑了储罐的受力情况、材料尺寸等关键因素,提出了基于故障树和蒙特卡罗的可靠性分析方法,并将此方法应用于实际原油储罐中。上述对于熔盐罐可靠性的研究是基于应力-强度理论和 Miner 线性损伤累积理论,采用贝叶

斯模型、蒙特卡洛法和建立故障树模型的研究方法,考虑了几何特征、故障原因以及故障形式等因素,针对储罐整体的可靠性进行分析预测。通常,焊缝是设备应力集中和疲劳开裂的敏感位置,目前对储罐焊缝的疲劳的研究还不多见。

焊缝的疲劳可靠性评价方法主要包括:①基于 Miner 线性累计损伤准则的焊接接头的可靠性评估方法^[9-10];②基于 Paris 理论复杂裂纹扩展疲劳可靠性评估的方法^[11-12];③基于 S-N 曲线和应力-强度干涉理论的焊接接头疲劳可靠性分析方法^[13];④基于结构应力法的角焊缝疲劳可靠性评估方法^[14]。上述方法目前主要在常温、低温设备的焊缝评价上得到应用,但还未涉及高温(—290℃)熔盐罐的焊缝分析。

基于实际工程现场安全评价的需要,本文基于 ASME BPVC. VIII. 2—2023 标准提出的疲劳寿命计算方法^[15],考虑了温度、焊缝尺寸、材料属性及模型参数等因素的分布情况,对某熔盐罐角焊缝进行了疲劳寿命和可靠性分析,为熔盐罐安全运维提供技术支持。

1 疲劳寿命评估模型

1.1 熔盐罐角焊缝疲劳寿命预测方法

疲劳寿命预测是指使用各种理论和经验方法来估计材料、零件或在经历循环载荷作用后发生疲劳破坏之前所能承受的循环次数或时间。对于角焊缝,采用等效结构应力预测疲劳寿命是目前较为主流的疲劳寿命预测方法^[16]。熔盐罐罐壁和底板的连接焊缝是典型的角焊缝结构。角焊缝位置的应力分布如图 1 所示,图中 σ_m 、 σ_b 分别为膜应力、弯曲应力。分解后,第一部分应力是与外力互相平衡的结构应力,第二部分应力则是缺口应力,它包含非线性应力部分,并处于自平衡状态。基于力平衡和断裂

力学理论,结构应力 σ_s 是焊趾贯穿厚度应力的线性化应力部分,消除了沿厚度方向自平衡的非线性峰值应力 σ_{nlp} 。

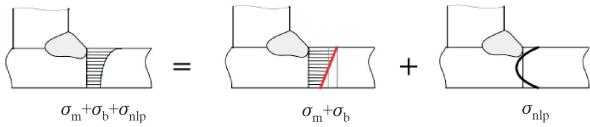


图 1 焊缝位置的应力状态^[17]

Fig. 1 Stress state at weld position^[17]

定义结构应力 σ_s 为膜应力 σ_m 与弯曲应力 σ_b 之和,可表示为

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_y}{t} + \frac{6m_x}{t^2} \quad (1)$$

式中: t 为角焊缝的平板板厚; f_y 为 y 方向上的力矩; m_x 为 x 方向上的弯矩。

本文的研究对象是熔盐罐罐底角焊缝,角焊缝在受到荷载时处于多轴应力状态。相关研究证明,对于此类型角焊缝,只需考虑法向正应力的影响,可忽略切向剪切应力的影响,原因是切向剪切应力对焊缝开裂的贡献很小,可以忽略不计^[18-21]。在某工况下的液位循环中,若最高液位的结构应力为 σ_{max} ,最低液位的结构应力为 σ_{min} ,则结构应力的变化幅值 $\Delta\sigma_s = \sigma_{max} - \sigma_{min}$,考虑缺口应力非线性作用的等效结构应力变化幅值 ΔS_{ess} ^[15] 为

$$\Delta S_{ess} = \Delta\sigma_s \left/ \left[t_{ess}^{\left(\frac{2-m_{ss}}{2m_{ss}} \right)} I_{m_{ss}}^{\frac{1}{m_{ss}}} f_M \right] \right. \quad (2)$$

其中 $m_{ss} = 3.6$; R_b 是结构应力评估中使用的修正系数, $R_b = \frac{|\Delta\sigma_b|}{|\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b|}$; $I_{m_{ss}}^{\frac{1}{m_{ss}}}$ 是形状系数; f_M 是平均应力修正系数, $f_M = \left(1 - \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \right)^{\frac{1}{m_{ss}}}$; t_{ess} 是结构应力计算时角焊缝平板的有效厚度,当 $t_{ess} \leq 16 \text{ mm}$ 时, t_{ess} 取 16 mm ; 当 $t_{ess} \geq 150 \text{ mm}$ 时, t_{ess} 取 150 mm ; 当 $16 \text{ mm} < t_{ess} < 150 \text{ mm}$ 时, $t_{ess} = t$ 。

当单轴加载导致焊缝出现多轴应力状态时,剪切应力 τ 不可忽略,考虑剪切应力的等效结构应力幅值计算公式为

$$\Delta S_{ess} = \left[\left(\frac{\Delta\sigma}{t_{ess}^{\left(\frac{2-m_{ss}}{2m_{ss}} \right)} I_{m_{ss}}^{\frac{1}{m_{ss}}} f_M} \right)^2 + 3 \left(\frac{\Delta\tau}{t_{ess}^{\left(\frac{2-m_{ss}}{2m_{ss}} \right)} I_{\tau}^{\frac{1}{m_{ss}}}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

基于等效结构应力的疲劳寿命评估方法中,计算应力幅值时不考虑残余应力的影响,但在计算寿命时,引入 f_1 系数来考虑疲劳改善法对焊接接头疲劳曲线的修正,该修正系数考虑了焊接后处理工艺(磨

削、锤击、TIG 焊)对疲劳寿命的影响。寿命 N 的计算公式为

$$N = \frac{f_1}{f_E} \left(\frac{f_{MT} C}{\Delta S_{ess}} \right)^{1/h} \quad (4)$$

式中: f_1 是疲劳改善法对焊接接头疲劳曲线的修正系数, $f_1 = 1.0 + 4.0 \times 10^{-0.0016(\Delta S_{ess}/C_{usm})^{1.6}}$; C_{usm} 是转换因子,当应力以 ksi 作为单位时, $C_{usm} = 1.0$,当应力以 MPa 作为单位时, $C_{usm} = 14.15$; f_E 是环境修正因子; f_{MT} 是材料和温度修正因子; E_T 是常温下的弹性模量; E_{ACS} 是服役温度下的弹性模量; C 和 h 为焊接接头疲劳曲线系数,代表了不同存活率下 $\Delta S_{ess}-N$ 曲线, C 和 h 取值如表 1 所示。为了保证焊接结构疲劳寿命的可靠性和保守性,ASME BPVC. VIII. 2—2023 标准要求 C 和 h 按照 99% 预测区间 (-3σ) 取值。

表 1 $\Delta S_{ess}-N$ 曲线中 C 和 h 取值^[15]

Table 1 Values of C and h in $\Delta S_{ess}-N$ curve^[15]

统计模式	C	h
中值	19 930.2	0.319 5
68% 以上预测区间 (1σ)	23 885.8	0.319 5
68% 以下预测区间 (-1σ)	16 629.7	0.319 5
95% 以上预测区间 (2σ)	28 626.5	0.319 5
95% 以下预测区间 (-2σ)	13 875.7	0.319 5
99% 以上预测区间 (3σ)	34 308.1	0.319 5
99% 以下预测区间 (-3σ)	11 577.9	0.319 5

1.2 疲劳寿命可靠性分析方法

1.2.1 参数不确定性分析及量化

参数不确定性广泛存在于熔盐罐的角焊缝中。光热设备的更新换代对结构的疲劳性能要求不断提高,其材料属性、结构尺寸及载荷环境等因素均对结构的疲劳寿命产生影响,对这些参数不确定性进行准确量化分析对于结构乃至整个装备的安全可靠运行愈发重要^[22]。熔盐罐角焊缝的参数不确定性主要表现为材料、几何结构、载荷以及疲劳寿命预测模型参数的分散性。

目前,研究参数不确定性对可靠性的影响,可以通过蒙特卡洛法、拉丁超立方抽样等方法,其中,蒙特卡洛法需要大量的样本来达到某一精度,而拉丁超立方准则是分层抽样,可以在较少的样本数量下获得较高的精度,相对来说,计算量小且精度高。

本文主要从物理不确定性、统计不确定性以及模型不确定性进行分析,依据拉丁超立方抽样方法对被分析参数进行量化^[23]。

1.2.2 拉丁超立方抽样步骤

本文角焊缝的各参数样本均为正态分布^[23],基

于正态分布的拉丁超立方抽样步骤如下。

(1) 区间划分: 将参数样本区间等概率划分为满足式(5)的 l 个子区间, 为

$$P(-\infty \leq X \leq I_1) = P(I_1 \leq X \leq I_2) \\ = \cdots = P(I_{N-1} \leq X \leq +\infty) = \frac{1}{l} \quad (5)$$

式中: X 为随机变量; I_i 为等概率区间坐标值。

(2) 区间归一化: 通过下式将 0 到 1 之间的随机浮点数 μ 映射为归一化区间的各子区间的随机数, 公式为

$$V_i = \frac{\mu}{l} + \frac{i-1}{l} \quad (6)$$

(3) 函数映射: 将 V_i 视为标准正态分布的分布函数值, 采用式(7) 借助标准正态分布反函数映射到 $1 - V_i$ 上分位点 ω_i , 公式为

$$\omega_i = \Phi^{-1}(V_i) \quad (7)$$

(4) 样本生成: 采用线性变换式(8)将 ω_i 映射为正态分布抽样散点, 公式为

$$x_i = \omega_i \sigma_x + \mu \quad (8)$$

式中: σ_x 为已知样本的正态分布的标准差。

1.2.3 Kolmogorov-Smirnov 检验

根据拉丁超立方抽样方法获得初始样本后, 将初始样本作为输入值代入计算模型获得输出值样本数据。为了判断输出样本是否满足正态分布, 需要进行 Kolmogorov-Smirnov 检验, 在 Kolmogorov-Smirnov 检验中的统计值 D

$$D = \sup_x |F_n(x) - F(x)| \quad (9)$$

式中: $\sup_x$ 为上取界算子; $F(x)$ 为累积分布函数。当 $D < D_\alpha^n$ 时, 样本服从以最优估计值为参数分布的假设通过检验, 其中 D_α^n 为置信水平为 α 时的临界值, 可查 Kolmogorov-Smirnov 临界值表获得。

1.2.4 基于等效结构应力的疲劳可靠性模型

Su 等^[17] 基于等效结构应力提出了一种考虑载荷、材料和寿命等随机性的疲劳可靠性模型, 解决了钢桥焊接细部概率疲劳寿命评估难的问题。本文在疲劳可靠性评估中, 将参数 C 作为一个随机变量, $C = C_0 \Delta_e^d$ ^[17]。应用拉丁超立方抽样方法, 获得应力和焊缝尺寸等参数的值, 代入式(2)和(3)中, 获得分布的 ΔS_{ess} ; 考虑 d 的分布情况, 将式(4)改写为概率 $\Delta S_{\text{ess}} - N$ 曲线方程如下

$$N = \frac{f_I}{f_E} \left(\frac{f_{\text{MT}} C}{\Delta S_{\text{ess}}} \right)^{1/h} = \frac{f_I}{f_E} \left(\frac{f_{\text{MT}} C_0 \Delta_e^d}{\Delta S_{\text{ess}}} \right)^{1/h} \quad (10)$$

式中: C_0 和 Δ_e 为常数, 需要根据表 1 和式(4) 所示 $\Delta S_{\text{ess}} - N$ 曲线系数求解; d 为概率因子, 服从标准正态分布 $N(0, 1)$ ^[17]。

1.2.5 疲劳可靠性建模与分析

(1) 应力-强度干涉理论模型。对于结构进行安全评定时, 通常根据结构自身材料的强度与结构所受的应力之间的大小确定结构是否处于安全状态。当结构自身材料的强度大于结构所承受的应力时, 结构仍能保持正常工作; 当结构自身材料的强度小于零件所承受的应力时, 结构就会发生失效。图 2 为应力-强度干涉模型, 图中 $f(S)$ 为应力概率密度, $f(\sigma)$ 为强度概率密度, 这两条概率曲线之间的阴影部分是“干涉区”, 即两个随机变量的概率密度存在交叉。干涉区的面积越大, 表明零件的可靠性越低; 干涉区的面积越小, 零件的可靠性就越高^[24]。 $f(\sigma)$ 和 $f(S)$ 的功能函数可以表示为

$$Z = \sigma - S \quad (11)$$

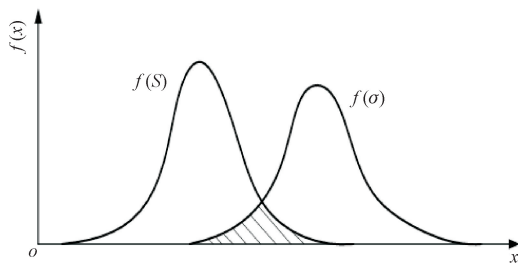


图 2 应力-强度干涉模型^[23]

Fig. 2 Stress-strength interference model^[23]

结构的失效概率可以用强度小于应力的概率表示。在实际工程中, 结构本身的强度 σ 和其所承受的应力 S 是相互独立的。若 σ 和 S 都服从均值为 μ_σ 和 μ_S 、标准差为 σ_σ 和 σ_S 的正态分布, 则 Z 服从 $\mu_Z = \mu_\sigma - \mu_S$ 、标准差为 $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_\sigma^2 + \sigma_S^2}$ 的正态分布。结构的失效概率为

$$F(X) = P(Z < 0) = \Phi \left(\frac{\mu_S - \mu_\sigma}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_\sigma^2}} \right) \quad (12)$$

式中: $\Phi(x)$ 为标准正态分布。

同理, 若 $\ln \sigma$ 和 $\ln S$ 分别服从均值为 $\mu_{\ln \sigma}$ 和 $\mu_{\ln S}$ 、标准差为 $\sigma_{\ln \sigma}$ 和 $\sigma_{\ln S}$ 的正态分布, 则 Z 服从 $\mu_Z = \mu_{\ln \sigma} - \mu_{\ln S}$ 、标准差为 $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_{\ln \sigma}^2 + \sigma_{\ln S}^2}$ 的正态分布。结构的失效概率为

$$F(X) = P(Z < 0) = \Phi \left(\frac{\mu_{\ln S} - \mu_{\ln \sigma}}{\sqrt{\sigma_{\ln S}^2 + \sigma_{\ln \sigma}^2}} \right) \quad (13)$$

(2) 熔盐罐角焊缝的疲劳可靠性建模。基于广义应力-强度干涉模型, 本文根据熔盐罐角焊缝的设计疲劳寿命和预测疲劳寿命, 建立基于疲劳寿命的熔盐罐角焊缝疲劳极限状态方程

$$g(x) = \ln \left(\frac{N_x}{N} \right) = \ln N_x - \ln N_0 \quad (14)$$

式中： N_x 为载荷循环下熔盐罐角焊缝的疲劳寿命； N_0 为熔盐罐角焊缝的设计寿命。

熔盐罐角焊缝的失效概率可以表示为

$$F(N_x) = P[\ln N_x < \ln N_0] =$$
$$P(g(x) < 0) = \Phi\left(\frac{\ln N_0 - \mu_{\ln N_x}}{\sigma_{\ln N_x}}\right) \quad (15)$$

2 实例分析

2.1 熔盐罐结构及有限元分析

本文以某槽式光热装置低温熔盐罐角焊缝为研究对象,使用大型非线性有限元软件 ABAQUS 建立角焊缝的实体模型和网格模型,根据运行工况获得典型载荷,基于 ASME BPVC. VIII. 2—2023 标准对角焊缝进行应力评定,并预测角焊缝的破坏位置及多工况下的疲劳寿命。在熔盐罐昼夜运行中,低温熔盐罐的液位根据天气条件和做功需求发生波动,使得角焊缝承受不同的周期性交变载荷而发生疲劳开裂。

2.1.1 熔盐罐结构

某光热装置的低温熔盐罐是带有圆顶的垂直圆柱形储热罐,主要由熔盐罐罐顶、罐壁和底板等结构组成,如图 3 所示。罐壁和底板交界位置的焊缝是角焊缝,其详细尺寸如图 4 所示。熔盐罐角焊缝、罐壁、底板的尺寸以及材料属性如表 2 所示,图中 P 为熔盐对罐壁的压强。

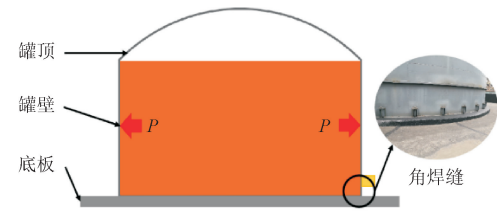


图 3 低温熔盐罐结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of low temperature molten salt tank

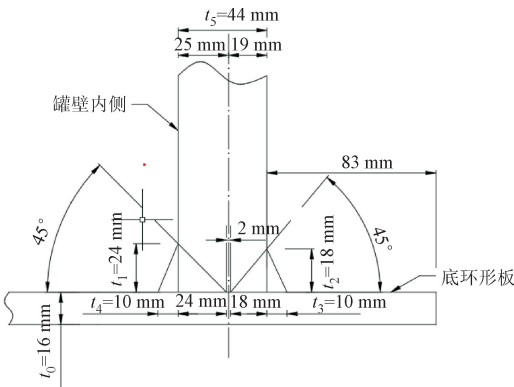


图 4 熔盐罐角焊缝尺寸

Fig. 4 Fillet weld size of molten salt tank

表 2 熔盐罐尺寸及材料属性^[25]

Table 2 Size and material attribute of molten salt tank^[25]

参数	数值	参数	数值
筒体高度 H/m	14	焊缝宽 t_4/mm	10
筒体直径 D/m	42	焊缝高 t_1/mm	24
筒体壁厚 t_5/mm	44	弹性模 E/GPa	194.2
屈服强度 MPa	262.0	抗拉强度 MPa	414.0
焊缝宽 t_3/mm	10	焊缝高 t_2/mm	18

2.1.2 熔盐罐角焊缝疲劳数值模型

由于熔盐罐的几何结构、载荷以及约束条件具有轴对称性的特点,因此本文将储罐简化为 2D 轴对称模型,角焊缝的数值模型如图 5 所示,图中 R 表示熔盐罐底板半径。对角焊缝几何结构进行网格划分,选取四结点双线性平面应力四边形单元(CPS4R)为计算单元,网格尺寸取 5 mm,共划分了 45 601 个单元。

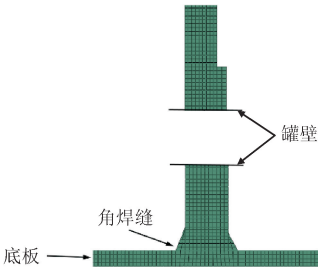


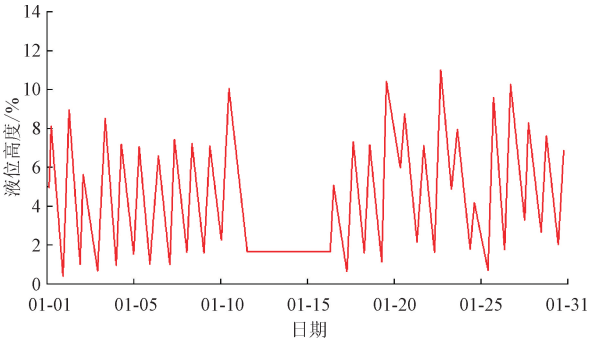
图 5 角焊缝数值模型

Fig. 5 Numerical model of fillet weld

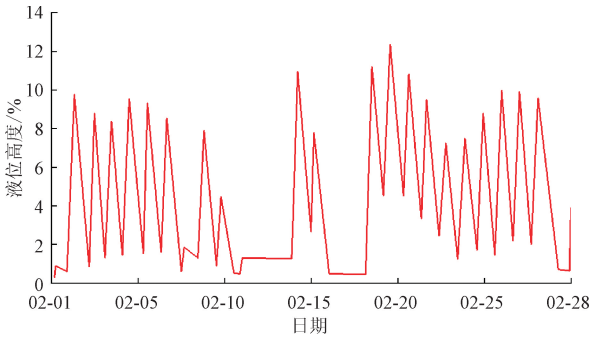
对角焊缝分析时,不考虑基础沉降,罐底部保温层完全固定约束。罐底与保温层无法相对运动,两者之间法向设置硬接触,切向设置摩擦系数为 0.3。在罐体和保温基础的中轴线径向设置径向约束。罐壁外围保温层与罐壁为硬接触。对角焊缝重力荷载通过设置重力加速度实现,静压力根据液位高度计算,即 $P = \rho gh$,其中 ρ 为熔盐密度,取值 $1\,930\text{ kg/m}^3$, h 为熔盐溶液中心高度距离液面的高度。

2.1.3 荷载工况

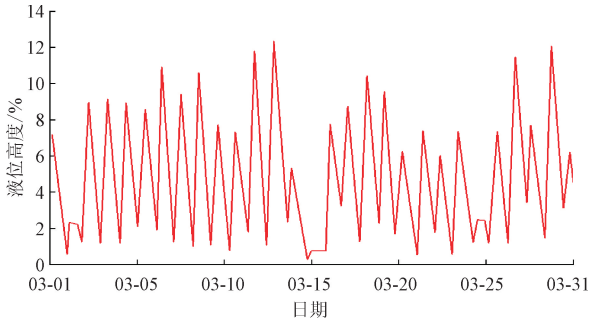
熔盐罐设计最高液位为 14 m,设计最低液位为 1 m,服役温度 $290\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温。对低温熔盐罐的液位进行分析,其中第一季度的液位变化如图 6 所示。



(a)1 月液位变化图



(b)2月液位变化图



(c)3月液位变化图

图 6 某低温熔盐罐 2023 年第一季度液位波动
Fig. 6 Liquid level fluctuation of a low-temperature molten salt tank in the first quarter in 2023

由图 6 可以看出,熔盐液位波动基本上是每日一次,是具有随机性的复杂载荷谱。详细分析每种载荷的疲劳寿命会显著增大工作量,为了简化问题,本文认为液位高度变化在 $\pm 0.5\text{ m}$ 范围内属于同一高度,忽略液位波动幅值小于 2 m 的情况。通过雨流计数法分析液位变化获得 6 种典型疲劳载荷工况,并统计了各载荷水平的分布频率,如表 3 所示。其中,最大液位波动为 $1.55\sim 12.39\text{ m}$,占比 $0.095\ 2$ 。

表 3 疲劳荷载工况
Table 3 Fatigue load conditions

荷载 工况	液位波动 幅值/m	液位 中值/m	工况出现 频数 n_i	工况出现 频率 P_i
1	1.55~12.39	6.97	9	0.095 2
2	1.55~11.15	6.35	18	0.190 5
3	1.55~10.53	6.04	9	0.095 2
4	1.55~9.29	5.42	12	0.142 9
5	1.55~8.05	4.8	12	0.142 9
6	3.10~9.91	6.51	30	0.333 3

2.1.4 熔盐罐角焊缝应力和疲劳寿命分析

对最高液位(14 m)情况下角焊缝的应力进行模拟分析,结果如图 7 所示。由于静压力作用,底环形板与内罐壁连接角焊缝结构处产生弯矩,致使底环形板发生弯曲并局部抬升离开地基。最大应力出现在角焊缝内侧与底环形板连接处,为 301.5 MPa ,最小应力出现在内罐底中心位置,仅为 0.2 MPa 。

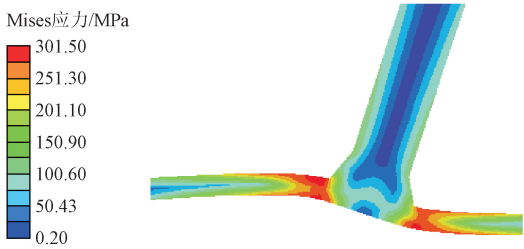


图 7 熔盐罐角焊缝的 Mises 应力分布图
Fig. 7 Mises stress distribution diagram of fillet weld of molten salt tank

相关研究表明,峰值应力并非焊趾破坏敏感点的唯一判断依据,等效结构应力才是^[18-21]。本文所研究的熔盐罐角焊缝属于峰值应力和等效结构应力峰值在同一位置的类型。将上述模拟的应力结果导入 FE-safe 软件中,对 6 种工况下的疲劳寿命进行分析,获得对应的结构应力,再根据式(2)和(3)计算出等效结构应力,计算中取 $f_M=0.95$ 、 $R_b=0.99$ 。计算结果表明,熔盐罐角焊缝的破坏位置在焊趾位置,以工况 1 为例,疲劳寿命如图 8 所示,其中输出变量为 LOG 疲劳寿命,其含义为角焊缝焊趾节点在指定荷载谱作用下,根据主 S-N 曲线计算出的发生疲劳破坏时的循环次数。在循环荷载作用下,角焊缝呈现红色的区域为结构最早发生破坏的位置。同理,对角焊缝其他工况的等效结构应力和疲劳寿命均进行了计算,结果如表 4 所示。

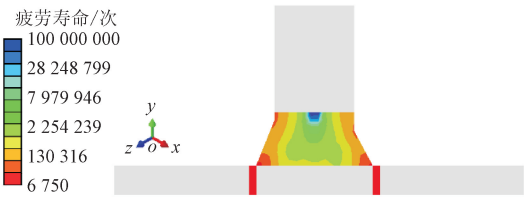


图 8 工况 1 角焊缝的疲劳寿命分布图
Fig. 8 Fatigue life distribution diagram of fillet weld under working condition 1

表 4 角焊缝等效结构应力和疲劳寿命

Table 4 Equivalent structural stress and fatigue life of fillet welds

荷载 工况	等效结构应力 幅值/MPa	等效结构应力 中值/MPa	疲劳寿命/ 次
1	482.93	310.45	6 705
2	427.74	282.86	10 726
3	400.14	269.06	13 830
4	372.55	241.46	18 098
5	289.76	213.87	45 363
6	303.55	289.76	38 386

2.2 熔盐罐角焊缝应力影响因素不确定性分析

2.2.1 物理不确定性

实际工程中,熔盐罐角焊缝的尺寸精度和材料属性不尽相同,载荷也会产生波动。根据熔盐罐的工作特点,本文选取 3 类参数展开详细分析^[26]。

(1)熔盐罐角焊缝的几何尺寸参数。本文选用熔盐罐的 6 个主要参数($t_0 \sim t_5$)进行不确定性分析。由于熔盐罐角焊缝结构尺寸在制造过程中存在制造差异,上述几何参数呈现一定的分散性。通过在实际工程中收集各位置的几何参数,利用经典概率论所得到的熔盐罐角焊缝关键几何随机变量的变异系数均为 0.01^[27]。

(2)熔盐罐角焊缝的载荷参数。在对熔盐罐角焊缝的疲劳寿命进行分析时,依据实际液位的变化和不同角焊缝的受力情况,分别对角焊缝施加静压力 P_i 。熔盐罐角焊缝受到的静压力 P_i 服从正态分布,均值为 0.265 MPa,变异系数为 0.006^[28]。

(3)熔盐罐角焊缝的材料性能参数。由于熔盐罐材料自身存在不同的微观缺陷,因此会造成弹性模量的不确定性。熔盐罐角焊缝的弹性模量 E 服从正态分布,均值为 194 211 MPa,变异系数为 0.03^[28]。

2.2.2 统计不确定性

在实际工程中,受熔盐罐尺寸、时间以及经济效益等限制而无法展开试验,本文根据熔盐罐实际运行情况展开数值模拟。本文提到的数据均根据有限元分析获得,但试验数据样本少,软件对数据分析和处理都会造成统计的不确定性^[29]。

2.3 疲劳寿命模型参数不确定性分析

在对熔盐罐角焊缝进行疲劳寿命预测时,由于使用的公式理想化、公式内含参数选用时有人为主观性等因素,会造成疲劳寿命模型的不确定性。

在实际分析过程中,为了减少模型的不确定性,本文将式(10)中模型参数 d 视为随机变量, d 服从均值为 0、方差为 1 的正态分布^[17]。

2.4 熔盐罐角焊缝的应力和等效结构应力分布

根据熔盐罐角焊缝的几何尺寸、材料性能和载荷参数等 8 个参数的分布情况,结合实际经验,当各参数的变化范围在正负 3 倍标准差之间时,可以认为样本数据满足正态分布。利用拉丁超立方算法随机抽样 1 000 组,代入熔盐罐角焊缝的有限元分析模型进行参数配置,经过有限元仿真后得到角焊缝应力和等效结构应力响应,工况 1 的应力和等效结构应力分布图分别如图 9 和图 10 所示,其中,应力和等效结构应力分布均呈现两头低、中间高、左右对称的形状。应力 σ 在 303 MPa 左右时应力相对频率最大,约为 13.5%,等效结构应力 ΔS_{ess} 在 583 MPa 左右时等效结构应力相对频率最大,约为 7%。

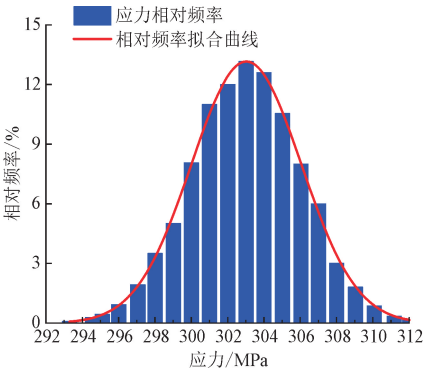


图 9 角焊缝应力分布图

Fig.9 Stress distribution diagram of fillet weld

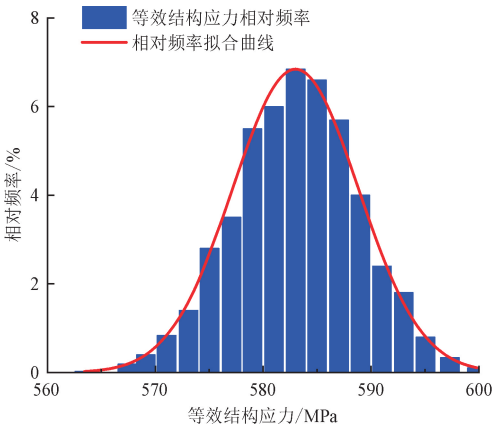


图 10 角焊缝等效结构应力分布图

Fig.10 Equivalent structural stress distribution diagram of fillet weld

根据式(9),角焊缝应力和等效结构应力满足 Kolmogorov-Smirnov 检验要求。将这 1 000 组样

本数据的应力和等效结构应力数据分别进行拟合。角焊缝的应力 σ 服从 $N(302.839, 10.027)$ 的正态分布, 等效结构应力 ΔS_{ess} 服从 $N(583.106, 35.419)$ 的正态分布。

2.5 熔盐罐角焊缝疲劳寿命分布

将 2.4 节有限元分析所得到的应力、等效结构应力和疲劳寿命计算模型的相关参数分别进行拉丁超立方抽样, 随机抽取 1 000 组样本数据, 代入式(5)所示的疲劳寿命预测模型中, 将计算得到的 1 000 组角焊缝疲劳寿命数据取对数后进行拟合, 得到的熔盐罐角焊缝工况 1 的疲劳寿命 (N_1) 分布如图 11 所示。可以看出, 中熔盐罐角焊缝对数疲劳寿命同样呈现两头低、中间高、左右对称的形状, 当对数疲劳寿命 $\ln N$ 约为 9 时对数疲劳寿命相对频率最大, 约为 24.5%。

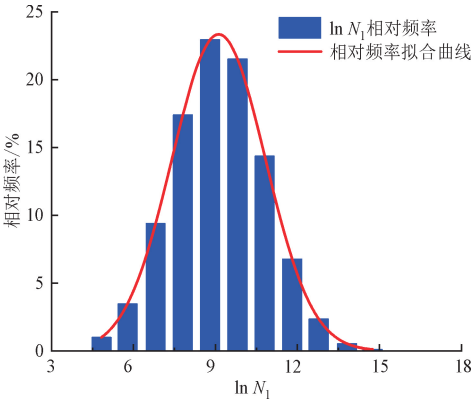


图 11 熔盐罐角焊缝对数疲劳寿命分布图
Fig. 11 Logarithmic fatigue life distribution of fillet welds

通过 Kolmogorov-Smirnov 检验, 角焊缝对数疲劳寿命 D 如表 5 所示, 满足 Kolmogorov-Smirnov 检验要求, 说明上述疲劳寿命符合对数正态分布 $\ln N_1 \sim N(9.117, 2.922)$ 。

表 6 熔盐罐角焊缝疲劳寿命失效概率

Table 6 Fatigue life failure probability of fillet weld of molten salt tank

荷载工况	疲劳寿命 N_i /次	出现频率 P_i	3 a 失效概率 F_{i1}	30 a 失效概率 F_{i2}	每个季度的损伤因子 D_i
1	6 705	0.095 2	0.107 5	0.571 4	0.001 3
2	10 726	0.190 5	0.072 1	0.454 2	0.001 7
3	13 830	0.095 2	0.026 5	0.405 2	0.000 7
4	18 098	0.142 9	0.043 1	0.355 7	0.000 6
5	45 363	0.142 9	0.014 8	0.203 3	0.000 3
6	38 386	0.333 3	0.017 4	0.229 6	0.000 8

根据 Miner 线性损伤累积理论, 疲劳寿命计算公式为 $N_f = 1/D_i = 1/\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$, 在实际工况下的疲劳寿命 $N_f = 1/0.005 4 = 186$ 个季度 = 46 a, 大于

表 5 Kolmogorov-Smirnov 检验结果

Table 5 Kolmogorov-Smirnov test results

参数	$D^{1.000}$	$D_{0.05}^{1.000}$	检验结果
σ	0.023 9	0.043	通过
ΔS_{ess}	0.014 2	0.043	通过
$\ln N_1$	0.016 6	0.043	通过

在实际中, 熔盐罐液位每天变化 1 次, 第一次检测时间为 3~6 a, 取检测时间 $N_0 = 3$ a, 累计循环次数为 1 095; 设计疲劳寿命 $N_{f0} = 30$ a, 累计循环次数为 10 950。由式(14)计算得到角焊缝的失效概率与疲劳寿命的分布。图 12 展示了工况 1 的失效概率与疲劳寿命的累积分布曲线, 图中散点为角焊缝在不同寿命取值下对应的失效概率计算结果。

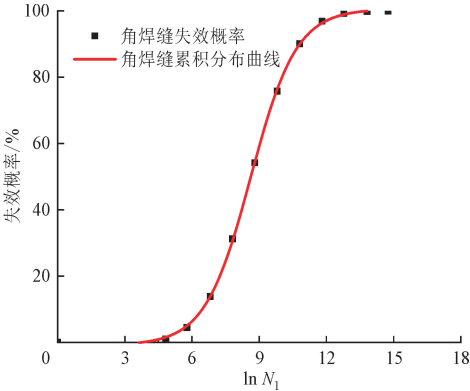


图 12 熔盐罐角焊缝疲劳寿命失效概率分布图
Fig. 12 Fatigue life failure probability distribution of fillet weld

根据工况 1 的疲劳寿命预测方法, 失效概率计算方和 Miner 线性损伤累积理论, 得到不同工况下的疲劳寿命 N_i 、失效概率 F_i 和损伤因子 D_i , 如果如表 6 所示, 工况 1 的疲劳寿命为 6 705 次。

$N_{f0} = 30$ a, 满足设计要求^[30-31]。根据疲劳寿命失效概率公式 $P = \sum_{i=1}^n P_i F_i$, 第一次检测时熔盐罐角焊缝服役 3 a, 其失效概率为 0.040 6, 运行 30 a 的失效

概率为 0.335 9。

3 结 论

(1)将应力影响因素和疲劳模型参数随机化,成功地建立了一种基于应力-强度干涉理论的角焊缝疲劳可靠性评估方法。

(2)对某光热装置低温熔盐罐角焊缝的疲劳进行实例分析,溶液罐液位每日波动一次,具有随机性。采用雨流计数法统计液位波动工况,进行简化后获得了 6 种典型液位波动工况和对应的频数,其中最大液位波动为 1.55~12.39 m,占比 0.095 2;在这种工况下,熔盐罐底最大应力出现在角焊缝内侧焊趾处,最大值为 301.5 MPa,疲劳循环次数为 6 705。

(3)对尺寸、载荷参数、弹性模量等参量进行随机化,应用拉丁超立方抽样方法对参数抽样并计算出对应的等效结构应力和疲劳寿命。Kolmogorov-Smirnov 检验结果表明,角焊缝焊趾处的等效结构应力 ΔS_{ess} 服从 $N(583.106, 35.419)$ 的分布,对数疲劳寿命服从 $N(9.117, 2.922)$ 的分布,角焊缝的平均疲劳寿命 N_f 为 46 a。服役 3 a 后(液位循环 1 095 次)的失效概率为 0.040 6,服役 30 a 的失效概率为 0.335 9。

参考文献:

[1] 王丹. 生命周期视角下液氨储罐风险评估方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.

[2] 刘明, 郑亚明, 多依丽, 等. 基于疲劳累积破坏机制的储罐结构动力可靠度分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(1): 32-36.

LIU Ming, ZHENG Yaming, DUO Yili, et al. Analysis on dynamic reliability of storage tank structure based on fatigue cumulative failure mechanism [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(1): 32-36.

[3] ZHANG Guilin, XIE Fei, WANG Dan. Reliability assessment method for tank bottom plates based on hierarchical Bayesian corrosion growth model [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part O Journal of Risk and Reliability, 2024, 238(1): 112-121.

[4] CHOI I H, CHANG D. Reliability and availability assessment of seabed storage tanks using fault tree analysis [J]. Ocean Engineering, 2016, 120: 1-14.

[5] LIU Fupeng, MA Jiandong, YE Zhongzhi, et al. Cross-scale reliability analysis framework for LNG storage tanks considering concrete material uncertainty [J]. Journal of Marine Science and Engineering,

2024, 12(2): 276.

[6] 李翊, 刘杰, 刘长沙, 等. 大型覆土式储罐多工况强度可靠性分析 [J]. 化工机械, 2024, 51(1): 28-36.

LI Yi, LIU Jie, LIU Changsha, et al. Strength reliability analysis of overburden storage tank under multiple working conditions [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2024, 51(1): 28-36.

[7] NHO I S, NAM Y Y, LEE H S. Structural safety assessment of independent spherical LNG tank (1st report)-fatigue strength analysis based on the S-N approach [J]. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 1993(30): 132-140.

[8] 杨志华, 杨德铨. 基于蒙特卡罗的故障树原油站库储罐可靠性分析 [J]. 当代化工研究, 2023(19): 67-69.

YANG Zhihua, YANG Decheng. Reliability analysis of fault tree crude oil station storage tank based on Monte Carlo method [J]. Modern Chemical Research, 2023(19): 67-69.

[9] 宋威, 满铮, 徐杰, 等. 含错位效应十字焊接接头疲劳可靠性评估 [J]. 焊接学报, 2023, 44(6): 20-26.

SONG Wei, MAN Zheng, XU Jie, et al. Fatigue reliability analysis of load-carrying cruciform joints with misalignment effects [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(6): 20-26.

[10] PARK Y S. Fatigue reliability analysis of steel welded member using probabilistic stress-life method [J]. International Journal of Steel Structures, 2019, 19(1): 71-81.

[11] ZHAO Weidong, LEIRA B J, FENG Guoqing, et al. A reliability approach to fatigue crack propagation analysis of ship structures in polar regions [J]. Marine Structures, 2021, 80: 103075.

[12] HUANG W, GARBATOV Y, GUEDES SOARES C. Fatigue reliability assessment of a complex welded structure subjected to multiple cracks [J]. Engineering Structures, 2013, 56: 868-879.

[13] ZHAO Xinyuan, XIE Shuqiang, ZHANG Yulong, et al. Fatigue reliability analysis of metro bogie frame based on effective notch stress method [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 131: 105811.

[14] ZHOU Shaoze, HAO Siqi, LIANG Longyin, et al. A fatigue reliability assessment model for welded structures based on the structural stress method [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2023, 15(1): 16878132221147461.

[15] The American Society of Mechanical Engineers. BPVC section VIII-rules for construction of pressure vessels division 2-alternative rules; BPVC. VIII. 2—2023 [S].

- New York, USA: ASME, 2023.
- [16] 蔡静雯, 陈秉智, 张旭. 基于等效结构应力法对含错边构件的疲劳性能分析 [J]. 机械, 2023, 50(10): 7-13.
- CAI Jingwen, CHEN Bingzhi, ZHANG Xu. Fatigue performance analysis of components with misalignments based on equivalent structural stress method [J]. Machinery, 2023, 50(10): 7-13.
- [17] SU Y H, YE X W, DING Y. ESS-based probabilistic fatigue life assessment of steel bridges: methodology, numerical simulation and application [J]. Engineering Structures, 2022, 253: 113802.
- [18] KYUBA H, DONG Pingsha. Equilibrium-equivalent structural stress approach to fatigue analysis of a rectangular hollow section joint [J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(1): 85-94.
- [19] 兆文忠, 李向伟, 董平沙. 焊接结构抗疲劳设计理论与方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [20] HONG J K, FORTE T P. Fatigue evaluation procedures for multi-axial stress state in welded joints [C]//ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York, USA: ASME, 2015: V004T03A010.
- [21] SUSMEL L, TOVO R. Local and structural multiaxial stress states in welded joints under fatigue loading [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(5/6): 564-575.
- [22] 左芳君. 机械结构的疲劳寿命预测与可靠性方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [23] 朱顺鹏. 高温复杂结构的混合概率故障物理建模与疲劳寿命预测 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [24] 秦大同, 谢里阳. 疲劳强度与可靠性设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [25] 李国强, 陈凯, 蒋首超, 等. 高温下 Q345 钢的材料性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2001, 31(1): 53-55.
- LI Guoqiang, CHEN Kai, JIANG Shouchao, et al. Experimental study on the material properties of Q345 steel at elevated temperatures [J]. Building Structure, 2001, 31(1): 53-55.
- [26] 陆艺鑫, 吕震宙, 冯凯旋, 等. 涡轮轴低周疲劳寿命可靠性分析及优化设计方法研究 [J]. 推进技术, 2022, 43(2): 8-20.
- LU Yixin, LÜ Zhenzhou, FENG Kaixuan, et al. Probability analysis and reliability based design optimization methods for low cycle fatigue life of turbine shaft [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(2): 8-20.
- [27] 贾贝熙, 吕震宙, 雷婧宇. 涡轮冷却叶片寿命可靠性分析参数化仿真平台 [J]. 航空学报, 2021, 42(12): 218-230.
- JIA Beixi, LÜ Zhenzhou, LEI Jingyu. Parameterized simulation platform of turbine cooling film blade life reliability analysis [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(12): 218-230.
- [28] 曾志伟. 航空发动机涡轮轴疲劳可靠性分析与优化 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [29] 周杰. 航空发动机涡轮叶片疲劳寿命及可靠性分析 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [30] 张海燕, 俞晓阳. 雨流法预测保护轴承寿命 [J]. 装备制造技术, 2023(5): 31-34.
- ZHANG Haiyan, YU Xiaoyang. The rain flow method predicts the life of the protective bearing [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(5): 31-34.
- [31] 蒋瑜. 基于 Minner 准则的卸船机疲劳寿命评估 [J]. 起重运输机械, 2021(11): 52-55.
- JIANG Yu. Fatigue life assessment of ship unloader based on Miner's criterion [J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2021(11): 52-55.

(编辑 亢列梅)