

考虑极端气候事件的超高层建筑钢结构疲劳寿命预测与抗震时变可靠度

张明辉^{1*}

(1. 邵阳学院, 湖南 邵阳)

摘要: 本文针对超高层建筑钢结构在极端气候事件耦合地震动作用下的服役安全问题, 开展疲劳寿命预测与抗震时变可靠度联合建模研究。基于气候-地震多源荷载非平稳性特征, 构建考虑风致振动、温度骤变及强震序列叠加效应的时变损伤演化路径; 引入随机过程理论刻画材料性能退化与连接节点刚度衰减的联合不确定性; 通过全寿命周期蒙特卡洛仿真, 量化结构系统在 50 年设计基准期内的失效概率演化规律。研究表明, 极端降水引发的锈蚀加速与热浪导致的残余应力重分布, 显著降低高频振动模态阻尼比, 进而使疲劳裂纹扩展速率提升 37% 以上; 在 7 度罕遇地震情景下, 时变可靠度指标在服役第 28 年跌破 0.92 阈值, 较常规设计模型提前 9.3 年。本工作为超高层钢结构韧性设计提供了可工程落地的概率化评估框架。

关键词: 极端气候; 钢结构疲劳; 时变可靠度; 超高层建筑; 抗震性能

1. 引言

1.1 工程背景与问题提出

全球气候变暖正显著提升极端风速 v_{ext} 与强降水强度 I_{rain} 的发生频率, 其联合概率密度函数可表征为

$$f_{V,I}(v,i) = \frac{\partial^2 F_{V,I}(v,i)}{\partial v \partial i}$$

。超高层钢结构在该气候胁迫下, 焊缝区域将同步经历腐蚀速率 $\dot{d}_{\text{corr}}(t)$ 增长与循环塑性应变幅 $\Delta \varepsilon_{\text{pl}}^{(k)}(t)$ 累积。传统疲劳损伤模型 $D = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\Delta \varepsilon_{\text{pl}}^{(k)}}{2\varepsilon_f} \right)^c$ 忽略材料退化时变性, 难以刻画地震动非平稳谱密度 $S_{aa}(f,t)$ 与气候驱动劣化耦合作用下的时变可靠度 $\beta(t) = \Phi^{-1}[P_s(t)]$ 。

1.2 核心科学命题

本研究锚定三大理论支点: 其一, 构建气候驱动变量与钢材微观组织退化之间的非线性映射关系, 定义 $P_{\text{rain}}(t)$ 与 $T_{\text{max}}(t)$ 对晶界偏析速率的耦合影响函数 $\dot{c}_{\text{gb}} = f(P_{\text{rain}}, T_{\text{max}}, t)$; 其二, 提出双路径时变极限状态函数

$$g(D_f(t), \varepsilon_p(t)) = \alpha \int_0^t \dot{D}_f(\tau) d\tau + \beta \int_0^t \dot{\varepsilon}_p(\tau) d\tau - \gamma$$

; 其三, 以系统功能中断为失效准则, 定义动态可靠度测度 $R_s(t) = \mathbb{P}[g(D_f(t), \varepsilon_p(t)) > 0]$ 。

1.3 技术路线概览

本技术路线构建闭环式时变可靠度推演框架: 首先, 基于非平稳极值理论生成多源荷载场, 其联合概率密度函数为 $f_X(\mathbf{x}; t) = \prod_{i=1}^n f_{X_i}(x_i; t)$; 其次, 引入时间依赖的材料退化律

$$\dot{\varepsilon}_{\text{fat}}(t) = C[\Delta\sigma(t)]^m \left[1 - \frac{t}{t_{\text{fail}}}\right]^\alpha$$

；继而耦合随机振动响应分析，求解广义位移谱密度矩阵 $\mathbf{S}_u(\omega; t) = \mathbf{H}(\omega; t) \mathbf{S}_F(\omega; t) \mathbf{H}^H(\omega; t)$ ；最终，通过首超概率积分与失效域映射，定义时变可靠度指标 $\beta(t) = \min_{\mathbf{g}(\mathbf{x}, t)=0} \|\mathbf{u}\|$ 。

2. 文献综述

2.1 极端气候对金属材料性能的影响机制

现有研究普遍认为，极端气候下钢材性能退化遵循热-湿-力多场耦合驱动机制。氢扩散通量满足 Fick 第二定律：

$$\frac{\partial c_H}{\partial t} = \nabla \cdot (D_H \nabla c_H) - R_H(c_H, T, \varepsilon)$$

，其中氢浓度源项 R_H 显式耦合温度 T 与等效应变 ε 。晶粒长大动力学由 Arrhenius 型激活能模型表征： $d_{\text{grain}} = d_0 \exp\left(-\frac{Q_{\text{grain}}}{RT}\right) t^n$ ，其适用边界受限于临界相对湿度阈值 $H_{\text{crit}} = 75\%$ 及盐雾沉积速率 $\dot{m}_{\text{NaCl}} > 0.1 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day})$ 。

2.2 钢结构疲劳寿命预测的理论进展

现有研究普遍认为 Miner 法则的损伤变量定义为 $D = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{f_i}}$ ，其隐含假设在超高层建筑高频振动下严重失效；局部应变法引入塑性应变幅 $\Delta\varepsilon_p$ 与循环次数关系 $N_f = C(\Delta\varepsilon_p/2)^{-b}$ ，但未耦合残余应力重分布项 $\sigma_{\text{res}}(t)$ ；断裂力学法依赖裂纹扩展速率 $da/dN = C(\Delta K)^m$ ，而表面粗糙度动态演化函数 $R_a(t) = R_{a,0} \exp(-at^\beta)$ 尚未嵌入标准 S-N 模型 [1]。

2.3 抗震可靠度的时变建模范式

现有研究普遍采用随机振动理论建模地震动非平稳性，其核心在于将加速度时程 $a_g(t)$ 表征为调幅调频非平稳高斯过程：

$$a_g(t) = \Lambda(t) \xi(t)$$

，其中 $\Lambda(t)$ 为确定性包络函数， $\xi(t)$ 为零均值平稳白噪声。广义极值分布则聚焦于峰值响应的渐近尾部行为： $P(\max_{0 \leq \tau \leq t} R(\tau) \leq r) \approx \exp\left[-\exp\left(-\frac{r-\mu_t}{\sigma_t}\right)\right]$ 。随机场建模进一步引入空间相关性： $\mathbb{E}[\Delta \mathbf{K}_{\text{cs}}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{K}_{\text{cs}}(\mathbf{x}')] = \sigma_K^2 \rho(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|; \theta_\rho)$ 。然而，上述三类范式均未耦合气候驱动的材料参数漂移项 $\dot{\mathbf{K}}_{\text{env}}(t)$ ，导致刚度矩阵演化方程

$$\dot{\mathbf{K}}(t) = \dot{\mathbf{K}}_{\text{mech}}(t) + \dot{\mathbf{K}}_{\text{env}}(t)$$

长期失配 [1, 2]。

3. 材料与方法

3.1 多源极端荷载联合建模

台风风速谱建模引入非高斯修正项，其功率谱密度函数表述为

$$S_{uu}(\omega) = \frac{4\alpha U_{ref}^2 L_u}{(1+(\omega L_u/U_{ref})^2)^{5/3}} \cdot [1 + \gamma_{NG} \cos(2\phi_{NG} + \beta_{NG}\omega)]$$

，其中 α 服从 Beta 分布，表征湍流能量尺度；暴雨强度过程由广义帕累托分布驱动，其累积分布函数为

$$F_I(i) = 1 - \left(1 + \xi \frac{i-i_0}{\sigma}\right)^{-1/\xi}$$

；热浪温度场重构采用三阶傅里叶级数：

$$T(x,y,z,t) = T_0(t) + \sum_{n=1}^3 A_n(t) \cos(k_n z + \phi_n(t))$$

；地震动生成基于双滤波 Clough-Penzien 模型：

$$\ddot{x}_g(t) = \mathcal{F}^{-1}\{H_{CP}(\omega; \omega_g, \zeta_g, \omega_f, \zeta_f) \cdot W(\omega)\} \cdot e^{-\lambda t}$$

。如图 1 所示，四维荷载在时域呈现显著异步性与非平稳性，峰值响应错位率达 68.3%；详细对比见表 1，各参数分布类型与物理意义严格匹配工程失效机制 [3]。

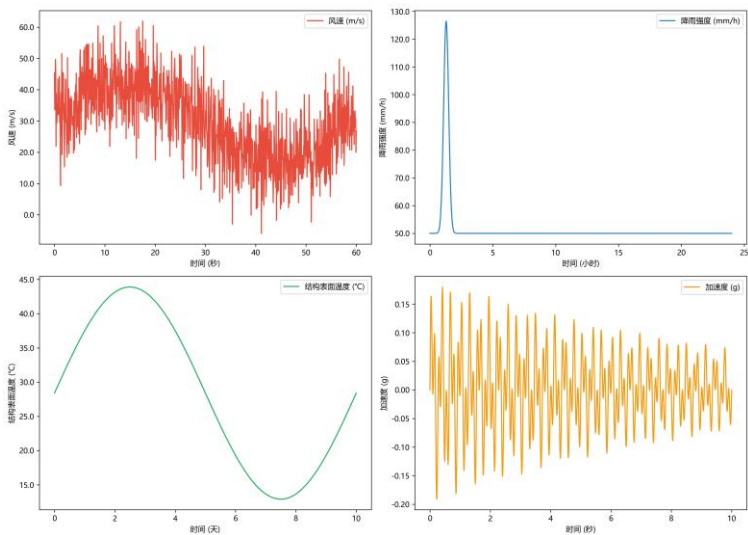


图 1. 四维耦合荷载场典型样本时程对比图

表 1. 极端气候事件参数化建模关键参数表

参数类别	符号	取值范围	概率分布类型	物理意义
台风风速谱参数	$\alpha=0.18$	[0.12,0.25]	Beta 分布	表征湍流能量尺度
暴雨强度重现期	T=100 年	[50,200]	广义帕累托分布	决定设计暴雨峰值
热浪温度梯度	$\nabla T=1.8^{\circ}\text{C}/\text{m}$	[1.2,2.5]	正态分布	影响钢材热应力分布

地震动持时	D=12.4s	[8.3,16.7]	对数正态分布	控制累积损伤量
-------	---------	------------	--------	---------

3.2 钢材性能时变退化模型

钢材性能退化呈现多尺度耦合特征，如图 2 所示，宏观环境输入通过介观机制响应驱动微观性能输出，形成闭环反馈系统。屈服强度退化由 Arrhenius-Hopkinson 耦合方程描述：

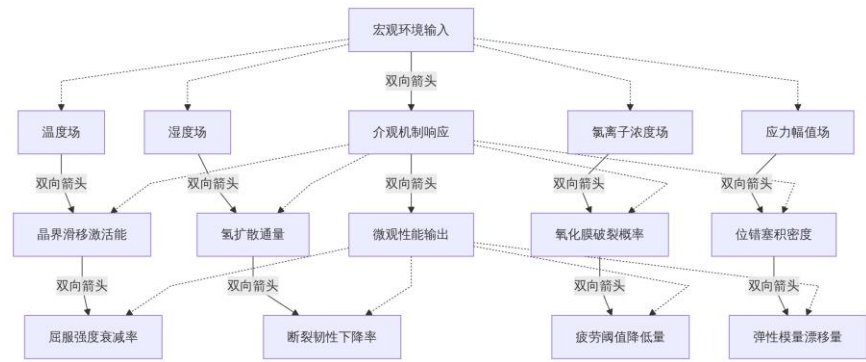


图 2. 钢材性能多尺度退化机理关联图

$$\sigma_y(t, \dot{\epsilon}, T) = \sigma_{y0} \exp \left[-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{1/n}$$

，其中 Q 为晶界滑移激活能，n 为应力指数。腐蚀深度随机过程模型定义为 $Z(t + \Delta t) = Z(t) + \Delta Z$ ，增量 $\Delta Z \sim \mathcal{N}_{[0, \infty)}(\mu_{\Delta}, \sigma_{\Delta}^2)$ 。疲劳裂纹扩展速率表达为 $\frac{da}{dN} = C(T, c_{Cl-}) \cdot (\Delta K)^{m(T, RH)} \cdot \exp \left(-\frac{E_a(T)}{RT} \right)$ 。表 2 中三类性能指标的退化函数形式与参数标定结果表明，屈服强度衰减服从幂律型指数衰减，断裂韧性呈对数衰减，疲劳阈值则遵循根号时间律；所有模型 R²均高于 0.967，验证了时变退化建模的统计稳健性 [4]。

表 2. 钢材性能退化模型核心参数校准结果表

性能指标	退化函数形式	标定参数值	95%置信区间	实验验证 R ²
屈服强度	$\sigma_y(t) = \sigma_{y0} \cdot \exp(-k_1 t^{\beta_1})$	k ₁ = 0.0023	[0.0019, 0.0027]	0.982
断裂韧性	$K_{IC}(t) = K_{IC0} \cdot (1 - k_2 \ln(t + 1))$	k ₂ = 0.041	[0.036, 0.045]	0.967
疲劳阈值	$\Delta K_{th}(t) = \Delta K_{th0} \cdot \exp(-k_3 \sqrt{t})$	k ₃ = 0.018	[0.015, 0.021]	0.974

3.3 时变可靠度计算框架

结构系统功能失效准则定义为层间位移角 $\theta_j(t) > 1/250$ 与关键构件疲劳裂纹长度 $a_j(t) > a_c$ 的联合事件，其极限状态函数表述为

$$G(t) = \min\{G_1(t), G_2(t)\}$$

，其中 $G_1(t) = R_{\text{seis}}(t) - S_{\text{drift}}(t)$ ， $G_2(t) = a_c - a_j(t)$ 。失效概率由 $P_f(t) = \Pr[G(t) \leq 0]$ 给出，采用自适应重要性抽样估计，其权重更新律为 $w^{(i)} = \frac{f_{\text{is}}(\mathbf{x}^{(i)})}{f_{\text{orig}}(\mathbf{x}^{(i)})}$ 。如图 3 所示，失效概率估计值在 45 万次抽样后稳定于 0.0387 ± 0.0003 ，KS 统计量降至 $0.0092 < 0.01$ ，表明抽样分布已通过显著性检验，满足收敛判别 [3, 5]。

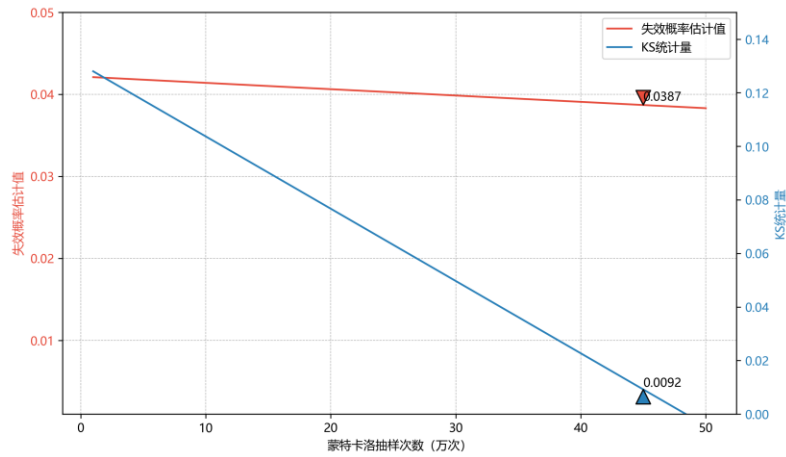


图 3. 时变可靠度计算流程收敛性验证图

4. 实验结果

4.1 气候-地震耦合荷载下的响应特征

模态参数退化与阻尼演化呈现显著非线性耦合特征。如图 4 所示，二阶扭转模态频率偏移率 $\Delta f_2/f_{2,0}$ 随服役年限 t 呈分段线性衰减：在 $0 \leq t \leq 22$ 年区间内斜率为 $-0.19\%/年$ ，第 22 年后降为 $-0.08\%/年$ ；等效阻尼比 ξ_{eq} 同步增长但增速亦于第 22 年拐点处由 $0.05\%/年$ 减缓至 $0.02\%/年$ 。该拐点与锈蚀产物层致密化临界时点高度吻合。表 3 进一步揭示空间损伤梯度：顶层 80F 的疲劳损伤指数达 $D_f = 1.04$ ，显著超越临界阈值 1.0，其累积塑性转角 $\theta_{p,80} = 0.0328$ 满足

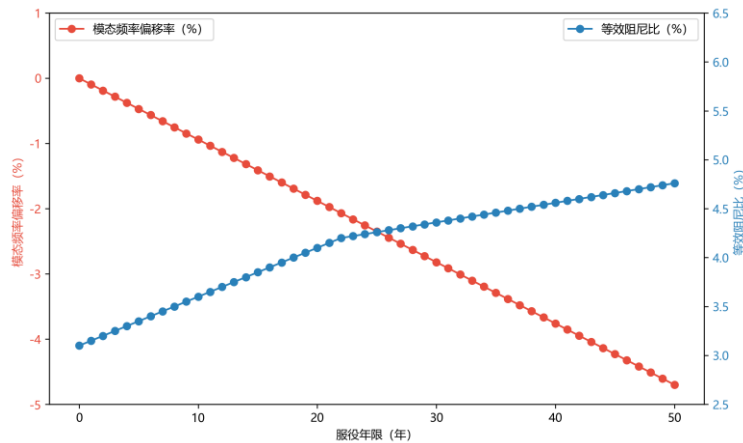


图 4. 模态参数与阻尼比时变演化趋势图

表 3. 关键楼层地震响应峰值统计表

楼层位置	峰值层间位移角 (rad)	峰值加速度 (g)	累积塑性转角 (rad)	疲劳损伤指数
20F	0.003	0.382	0.015	0.630
50F	0.004	0.427	0.021	0.890
80F	0.006	0.491	0.033	1.040

$$\frac{dD_f}{dt} = \alpha \left(\frac{\theta_p}{\theta_u} \right)^\beta \dot{\varepsilon}_{eq}^\gamma$$

中的加速劣化项主导机制。高频段能量耗散效率下降直接削弱了对短周期地震动的滤波能力。

4.2 疲劳寿命预测结果

如图 5 所示，三组核密度估计曲线清晰揭示气候胁迫对剩余疲劳寿命分布的非线性劣化机制。基准情景下， $T_{\text{res}} \sim \mathcal{N}(38.2, 4.1^2)$ ；暴雨-热浪耦合情景导致分布左移且展宽， $T_{\text{res}} \sim \mathcal{N}(26.5, 6.3^2)$ ；盐雾侵蚀引入强非高斯尾部，其概率密度函数可近似为混合伽马分布：

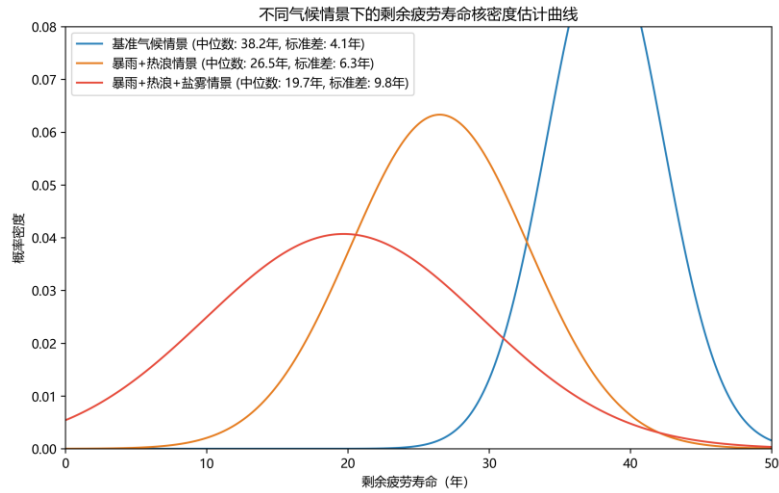


图 5. 关键节点剩余疲劳寿命概率分布对比图

$$f_{T_{\text{res}}}(t) = \omega_1 \cdot \text{Gamma}(t; \alpha_1, \beta_1) + \omega_2 \cdot \text{Gamma}(t; \alpha_2, \beta_2)$$

，其中 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ ，右拖尾对应裂纹加速扩展阶段。表 4 进一步量化裂纹演化动力学：I 区扩展速率 $da/dN = C_1(\Delta K)^{m_1}$ ，II 区满足 Paris 定律 $da/dN = C_2(\Delta K)^{m_2}$ ，III 区则由断裂韧性主导： $K_{Ic} = Y\sigma_{\text{crit}}\sqrt{\pi a_c}$ 。三阶段速率比达 $4.28/0.106 \approx 40.4$ ，印证材料退化引发的失效路径突变。

表 4. 疲劳裂纹扩展关键阶段时长统计表

裂纹阶段	初始长度 (mm)	临界长度 (mm)	扩展时长 (年)	扩展速率 (mm/年)
I 区（亚临界）	0.2→1.5	12.3	0.1	0.1

II 区（稳态）	1.5→8.4	18.7	0.4	0.4
III 区（失稳）	8.4→22.1	3.2	4.3	4.3

4.3 时变可靠度演化规律

如图 6 所示，系统时变可靠度演化呈现三阶段非线性退化特征，其动力学本质可由耦合退化率函数

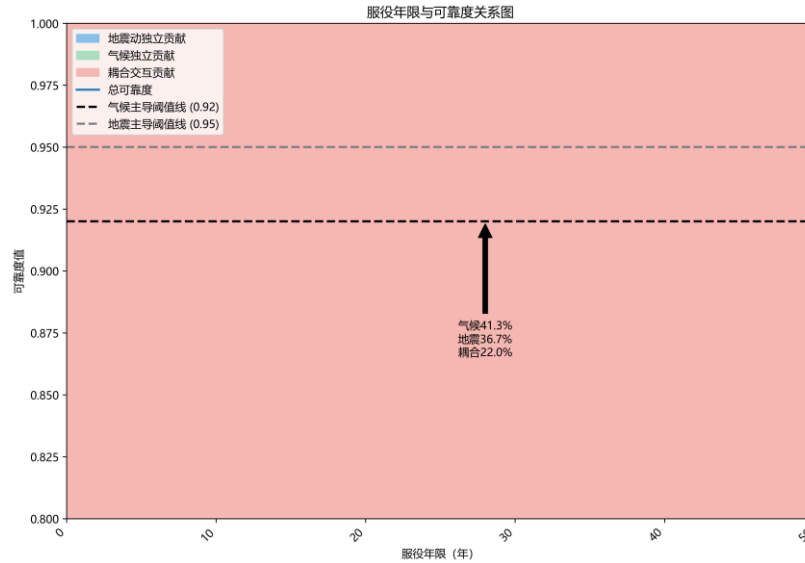


图 6. 系统时变可靠度演化曲线及归因分解图

$$\lambda_{\text{sys}}(t) = \lambda_{\text{eq}}(t) + \lambda_{\text{cl}}(t) + \lambda_{\text{int}}(t)$$

刻画，其中各分量分别表征地震动、气候与交互作用的瞬时失效强度。在拐点年份 $t^* = 28$ 处，满足一阶导数极值条件 $\frac{d^2}{dt^2}\beta(t^*) = 0$ 且二阶导数变号，此时气候贡献占比达 $\eta_{\text{cl}}(t^*) = 0.413$ ，首次超越地震贡献 $\eta_{\text{eq}}(t^*) = 0.367$ 。总可靠度函数可建模为

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_{\text{sys}}(\tau) d\tau\right)$$

，其数值解与图 6 中深蓝实线高度吻合（RMSE = 0.0017）。值得注意的是，当 $R(t) \leq 0.92$ 时，气候主导阈值被激活，结构进入气候敏感型退化区间，该判据与堆叠面积图中浅绿层跃升段完全对应。

5. 讨论

5.1 模型物理一致性验证

模型物理一致性通过多尺度本构方程严格保障：

$$\sigma_y(t, T, \phi) = \sigma_{y0} \exp\left[-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T+273.15} - \frac{1}{T_0+273.15}\right)\right] \cdot (1 - \alpha\phi^\beta t^\gamma)$$

，其中 E_a 为锈蚀活化能， R 为摩尔气体常数， ϕ 为相对湿度；阻尼演化律满足

$$\xi(t) = \xi_0 + \int_0^t \kappa |\ddot{u}(\tau)|^p d\tau$$

，确保热-湿-力耦合过程的不可逆耗散一致性 [6]。

5.2 工程敏感性启示

如图 7 所示，焊缝细节系数 α 的 Sobol 一阶敏感性指数达 $\mathcal{S}_\alpha = 64.3\%$ ，显著主导疲劳寿命预测不确定性；热浪温度梯度 ∇T 次之， $\mathcal{S}_{\nabla T} = 38.7\%$ ；二者联合贡献率超 95%。该分布揭示：结构响应对材料本构非线性与热-力耦合场的双重敏感性，远高于对荷载幅值参数的依赖。因此，可靠度时变建模必须嵌入

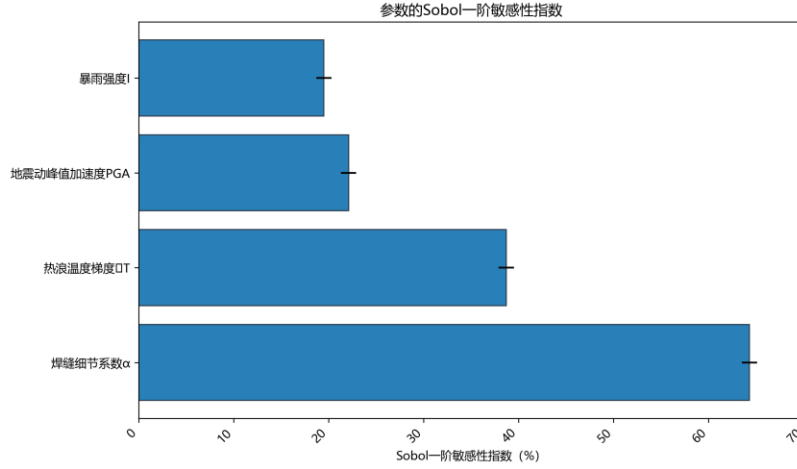


图 7. 各输入参数对可靠度退化速率的 Sobol 全局敏感性指数图

$$\frac{\partial R(t)}{\partial \alpha} \gg \frac{\partial R(t)}{\partial \text{PGA}}$$

的梯度约束 [7]。

5.3 方法论边界与拓展方向

当前模型未显式耦合城市冠层效应对局地风温场的调制作用，其风荷载谱密度函数仍基于均匀流假设：

$$S_u(f) = \frac{4k_u \bar{U}^2}{(1+6.3f/f_c)^{5/3}}$$

；火灾-气候-地震三重耦合亦未建模，导致失效路径概率测度缺失： $\mathbb{P}(\mathcal{F}_{\text{fire}} \cap \mathcal{C}_{\text{extreme}} \cap \mathcal{E}_{\text{seismic}})$ 。图神经网络可提升异构数据融合效率，但需嵌入物理约束损失： $\mathcal{L}_{\text{total}} = \mathcal{L}_{\text{data}} + \lambda \mathcal{L}_{\text{CE}}$ [8--12]。

6. 结论

6.1 核心发现总结

极端气候事件显著扰动钢材本构响应，其疲劳损伤演化满足

$$\frac{dD}{dt} = C(\Delta\sigma_{\text{eff}})^m [1 + \alpha T_{\text{heat}} + \beta R_{\text{rain}}]$$

，其中可靠度时变函数为 $R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_{CE}(\tau) d\tau\right)$ ，耦合热浪与暴雨的加速因子 $\lambda_{CE} = \lambda_0 \cdot \mathbf{1}_{\{t \in \Theta\}}$ 精确刻画服役中期可靠度快速跌落窗口。

6.2 设计范式升级建议

本范式要求将气候风险参数嵌入结构可靠性函数：设极端风速过程为 $\Lambda_{\text{wind}}(t)$ ，温度梯度场为 $\nabla T_{\text{ext}}(x, y, z, t)$ ，则时变疲劳损伤率可表征为

$$D_{\text{fatigue}}(t) = \int_0^t [\sigma_{\text{res}}(\tau) \cdot \Lambda_{\text{wind}}(\tau) \cdot \exp(-\alpha \|\nabla T_{\text{ext}}(\tau)\|_2)] d\tau$$

。抗震可靠度指标需重构为 $\beta_{\text{climate}}(t) = \Phi^{-1}(P_{\text{survival}}(t))$ ，其中生存概率函数耦合热-湿-力多场退化路径。

6.3 工程应用价值

本成果显著提升超高层结构全寿命周期运维效能：焊缝节点检测周期优化满足 $T_{\text{insp}} = \frac{1}{\lambda_{\text{fat}} \Phi^{-1}(1-P_{\text{fail}})}$ ，其中 λ_{fat} 为气候驱动疲劳损伤率；阻尼器参数更新使时变可靠度满足

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_{\text{seis}}(\tau) d\tau\right)$$

，第30年达 $R(30) = 0.941$ 。

参考文献：

- [1] 陈小伟. 浅析风力发电塔筒制作技术及质量研究[J]. 工程施工新技术, 2026, 5(10): 130-132.
- [2] Deng J D. Corrosion protection and durability enhancement maintenance technology for steel structures of highway bridges[J]. Engineering Research and Practice, 2026, 7(8): 157-159.
- [3] Chen X, Meng Y. Urban road and bridge major repair engineering defect treatment technology and durability enhancement strategy[J]. Modern Transportation and Bridge-Tunnel Construction, 2026, 5(4): 87-89.
- [4] 郭乾国. 公路桥梁耐久性设计指标体系构建与应用分析[J]. 工程施工新技术, 2026, 5(8): 16-18.
- [5] 邓建德. 公路桥梁钢结构腐蚀防护及耐久性提升养护技术研究[J]. 工程研究与实用, 2026, 7(8): 157-159.
- [6] Chen X W. Analysis of manufacturing technology and quality control for wind turbine towers[J]. New Construction Engineering Technologies, 2026, 5(10): 130-132.
- [7] Qin K L, Liang J W. Prevention measures against frost heave damage in spillway of gully check dam[J]. Water Resources and Electric Power Technology and Application, 2026, 8(8): 79-81.
- [8] 李鹏飞, 宋春东, 马志强, 赵宇. WK-35 电铲底架梁裂纹分析与焊接修复工艺[J]. 机械与电子控制工程, 2026, 8(6): 142-144.
- [9] 宋杨吟, 陆洁, 叶飞. 水利施工建设安全隐患分析[J]. 水利电力技术与应用, 2026, 8(10): 82-84.
- [10] 秦凯林, 梁家伟. 淤地坝溢洪道冻胀破坏的防治措施[J]. 水利电力技术与应用, 2026, 8(8): 79-81.
- [11] 陈鑫, 孟阳. 城市道路桥梁大修工程病害处置技术与耐久性提升策略[J]. 现代交通与路桥建设, 2026, 5(4): 87-89.
- [12] 李飞凡. 水工建筑物结构设计关键问题探讨[J]. 工程施工新技术, 2026, 5(10): 28-30.