

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20251117001

文章编号:1674-599X(2026)02-0001-12

引用格式:郝琦,罗鹏林,王传征,等.局部点蚀风屏障疲劳性能分析和寿命评估[J].交通科学与工程,2026,42(2):1-12.

Citation: HAO Qi, LUO Penglin, WANG Chuazheng, et al. Fatigue performance analysis and life evaluation of wind barrier with local pitting [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2026,42(2): 1-12.

局部点蚀风屏障疲劳性能分析和寿命评估

郝琦¹,罗鹏林¹,王传征¹,李春明¹,张向煜¹,聂彪²,郭文杰²

(1. 中国铁路南昌局集团有限公司 厦门工务段,福建 厦门 361011;

2. 华东交通大学 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室,江西 南昌 330013)

摘要:【目的】揭示局部点蚀对风屏障疲劳性能的影响机理。【方法】以沿海地区风屏障为研究对象开展疲劳性能研究。基于谐波叠加法与计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术建立考虑随机脉动风时程与车致脉动风时程的风屏障疲劳性能分析模型。采用Palmgren-Miner线性累积损伤理论,利用Fe-safe软件计算风屏障的剩余疲劳寿命。通过参数分析系统研究点蚀深度、宽度、数量和间距等关键参数对风屏障疲劳性能的影响规律。【结果】风屏障疲劳寿命随蚀坑深度的增加呈显著线性下降趋势,随蚀坑宽度的增加呈上升趋势;蚀坑数量增多会导致疲劳寿命明显降低,而蚀坑间距对寿命的影响相对较小;半椭圆形蚀坑的几何形态通过改变局部应力集中特征影响风屏障的疲劳性能。【结论】本研究揭示了局部点蚀与疲劳荷载耦合作用下风屏障的损伤机理,为锈蚀风屏障的疲劳寿命评估及可靠性分析提供了理论依据与数据支撑。

关键词:疲劳寿命;数值计算;风屏障;脉动风;点蚀

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

Fatigue performance analysis and life evaluation of wind barrier with local pitting

HAO Qi¹, LUO Penglin¹, WANG Chuazheng¹, LI Chunming¹, ZHANG Xiangyu¹, NIE Biao², GUO Wenjie²

(1. Xiamen Engineering Section, Nanchang Bureau Group Co., Ltd. of China Railway, Xiamen 361011, China;

2. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: [Purposes] The aim of the paper is to elucidate the mechanism by which local pitting influences the fatigue performance of wind barriers. [Methods] This study investigated fatigue performance with coastal wind barriers as research objects. A fatigue performance analysis model for wind barriers was established using the harmonic superposition method and computational fluid dynamics (CFD) technology, accounting for both random fluctuating wind time histories and train-induced fluctuating wind time histories. The Palmgren-Miner linear cumulative damage theory was applied, and the remaining fatigue life of the wind barriers was calculated using Fe-safe software. A systematic parameter analysis was conducted to investigate the influence patterns of key parameters—pitting depth, width, number, and spacing—on the fatigue performance of wind barriers. [Findings] The fatigue life of wind barriers exhibits a significant linear decrease with increasing pit depth and an upward trend with increasing pit width. An increase in pit number leads to a marked reduction in

收稿日期:2025-11-17

基金项目:国家自然科学基金项目(52308313)

通信作者:聂彪(1992—),男,副教授,主要从事工程结构耐久性和可靠性方面的研究工作。E-mail:xnniebiao@ecjtu.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

fatigue life, while pit spacing has a relatively minor impact on life. The geometric shape of hemi-ellipsoidal pits influences the fatigue performance of wind barriers by altering the characteristics of local stress concentration. [Conclusions] This study elucidates the damage mechanism of wind barriers under the coupled action of local pitting and fatigue loading, providing theoretical foundations and data support for fatigue life assessment and reliability analysis of corroded wind barriers.

Key words: fatigue life; numerical calculation; wind barrier; fluctuating wind; pitting

随着我国铁路建设的快速发展,越来越多的线路穿越沿海、盐湖等富含盐分的特殊地理区域。风屏障作为保障列车运行安全的重要设施,长期暴露在高盐环境中,不仅受到强风荷载的反复作用,还遭受盐雾侵蚀的影响。腐蚀与疲劳的耦合作用极大地影响了风屏障的完整性和使用寿命。

目前,关于风屏障腐蚀疲劳问题的研究还较少,多数研究仅对风屏障的静动力响应进行了分析^[1-2]。张田等^[3]以兰新铁路第二双线桥上的风屏障为工程实例,考虑外部自然风荷载和车致脉动力荷载,基于累积损伤理论评估了风屏障的疲劳性能,研究发现风屏障结构的钢立柱底部、防风板中部为危险位置,防风板的应力远高于钢立柱的应力,应重点关注。WU等^[4]通过建立计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模型和有限元模型,基于雨流计数法和Miner线性累积疲劳损伤理论,对我国3个城市声屏障的疲劳寿命进行了预测,结果表明,声屏障的疲劳寿命与风况、列车运行方式密切相关。从上述分析可以看出,腐蚀与疲劳是风屏障面临的严重问题之一,具有相当大的普遍性和危害性。

国内外学者针对腐蚀疲劳裂纹萌生、扩展机理开展了大量研究。COMER等^[5]针对Zeron100焊接金属在合成海水中的腐蚀和疲劳性能进行了研究,结果表明,在低、中和高塑性应变振幅下金属样品的疲劳寿命均明显缩短。KOVALOV等^[6]开发了通用腐蚀疲劳模型(GCFM),用于预测金属在循环荷载下的腐蚀疲劳裂纹增长率。HAN等^[7]采用理论与试验验证相结合的方法,将应力腐蚀损伤与疲劳损伤进行非线性耦合,得到了腐蚀疲劳损伤演化规律,并依托试验确定了腐蚀疲劳损伤演化参数,形成了基于损伤演化规律的LY12CZ铝合金腐蚀疲劳寿命预测模型。国内外学者对于钢结构疲劳寿命的评估与预测已有一定的研究,如通过对腐蚀状况下钢结构疲劳寿命的分析,研究了钢结构疲劳寿命的变化规律^[8-9]。腐蚀与疲劳荷载耦合作用下的风屏障破坏机理尚不清楚,亟待开展研究。

为此,本文以某沿海地区风屏障为研究对象,研究了点蚀损伤、疲劳荷载对风屏障疲劳性能的影响;建立了含半椭球形蚀坑的风屏障有限元模型,分析了蚀坑深度、宽度、个数、间距等参数下锈蚀风屏障的疲劳性能;基于谐波叠加法建立了考虑随机脉动风荷载的风屏障模型,实现了对“H”形钢立柱应力时程的模拟,计算出了风屏障的剩余疲劳寿命,为后续锈蚀风屏障疲劳寿命评估和可靠性分析提供了理论依据和数据支撑。

1 风屏障风压时程模拟

1.1 自然风荷载风压时程

风屏障在运营过程中所受到的荷载主要为横向荷载,包括车致脉动风荷载及自然风荷载。对于自然风荷载,本文采取谐波叠加法模拟脉动风场,风速谱采用《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[10]中的Davenport脉动风速谱,通过脉动风压时程公式可以推导出脉动风荷载时程函数:

$$F(t) = \mu_s(z_i)A(z_i)W(z_i, t) \quad (1)$$

式中: $\mu_s(z_i)$ 、 $A(z_i)$ 、 $W(z_i, t)$ 分别为风屏障 z_i 高度处的体形系数、迎风面积和脉动风压。

为了研究风屏障不同高度处风压的相关性,本文采用Davenport自相关函数描述空间中两点脉动风速的空间相关性。空间中两点 (y_1, z_1) 、 (y_2, z_2) 的自相关函数为:

$$C_{\text{oh}}(n) = \exp \left[-\frac{2n \sqrt{C_y^2(y_1 - y_2)^2 + C_z^2(z_1 - z_2)^2}}{U(z_1) + U(z_2)} \right] \quad (2)$$

式中: C_y 、 C_z 均为指数衰减系数, C_y 取为12, C_z 取为8; n 为频率; $U(z_1)$ 、 $U(z_2)$ 分别为 z_1 、 z_2 高度处的平均风速。

为研究风屏障不同高度处风压的空间相关性,本文在风屏障上沿竖向均匀布置了4个监测点:1号点位于1/4高度处,2号点位于1/2高度处,3号点位

于3/4高度处,4号点位于顶端。图1给出了不同高度处的自相关函数值。从图1可以看出,自相关函数值不随高度的变化而剧烈变化,表明模拟结果具有平稳性。

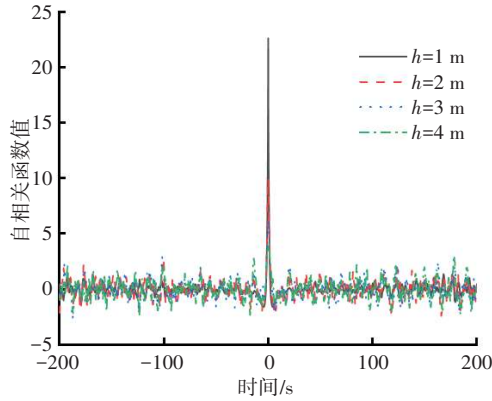
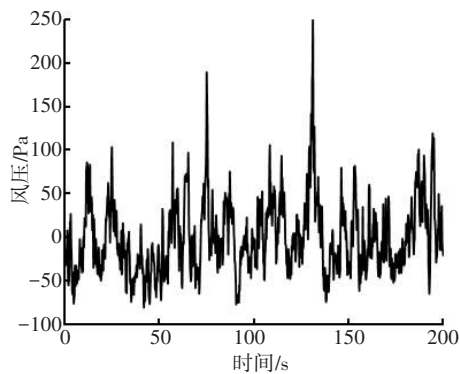


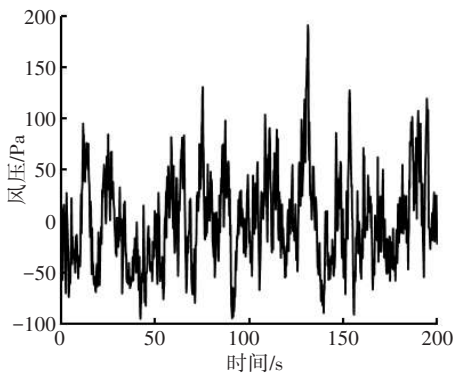
图1 不同高度处的自相关函数值

Fig. 1 Autocorrelation function values at different heights

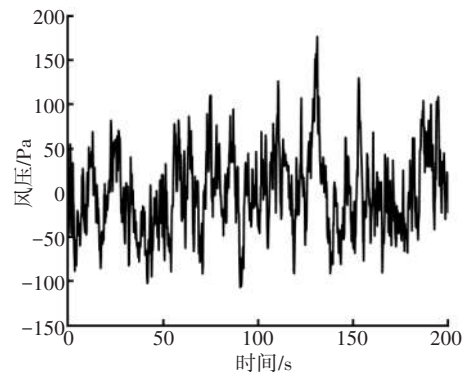
根据上述理论,本文应用MATLAB软件编程模拟风荷载,分别得到风屏障顶端(高4 m)、3/4高度处(高3 m)、1/2高度处(高2 m)、1/4高度处(高1 m)的风压时程曲线(图2)及功率谱密度曲线(图3)。体形系数 $\mu_s(z_i)$ 取为1.3,基本风速 $\bar{v}_{10}=17.89$ m/s,地面粗糙度系数 $k=0.00129$,大气密度 $\rho=1/820$,采样点数 $N=1024$,模拟时长为200 s,时间间隔为0.2 s,风屏障高4 m。



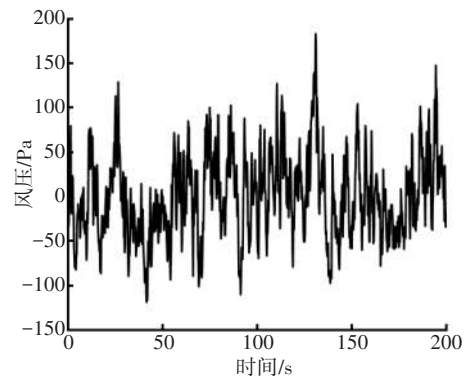
(a) 1 m处



(b) 2 m处



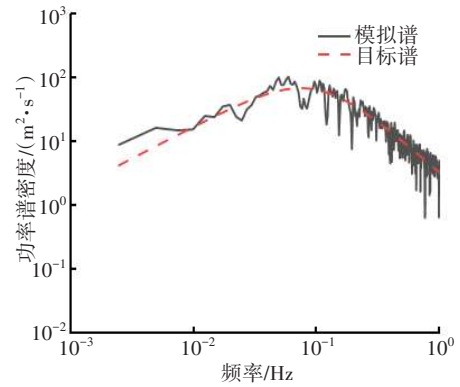
(c) 3 m处



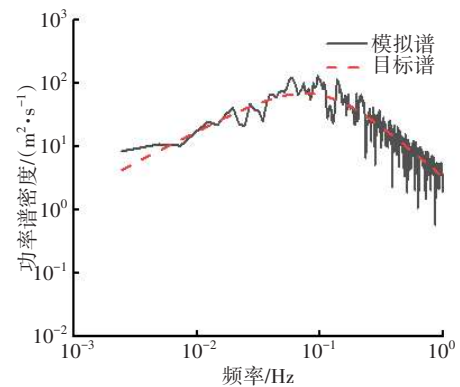
(d) 4 m处

图2 风屏障不同高度处的风压时程曲线

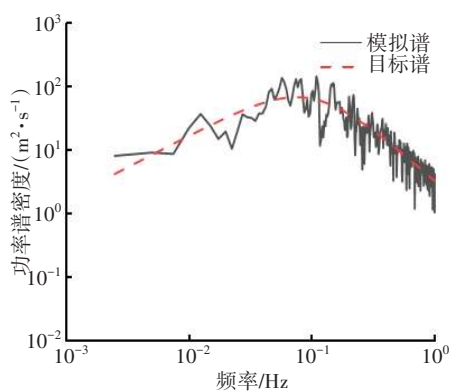
Fig. 2 Wind pressure time history curve at different heights of wind barrier



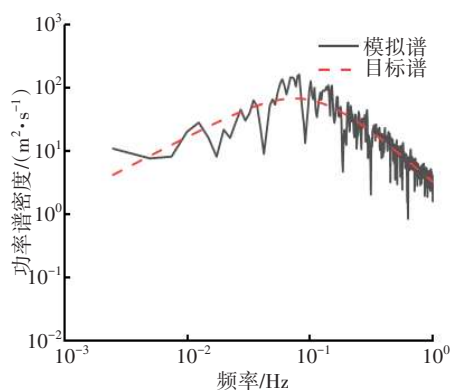
(a) 1 m处



(b) 2 m处



(c) 3 m处



(d) 4 m处

图3 风屏障不同高度处的脉动风功率谱

Fig. 3 Fluctuating wind power spectra at different heights of wind barrier

1.2 车致脉动风时程

1.2.1 CFD模型的建立

本研究以CRH380B型高速列车为原型建立数值计算模型。在实际运行过程中该类型列车通常采用8节或更多编组,但研究表明列车在运行过程中对周围气流场产生扰动的主要是头车和尾车,中间车厢对气流场影响较小^[11]。为提高计算效率,本文参考文献[12]对列车模型进行适当简化,保留完整的头车和尾车结构,中间仅保留一节代表性车厢。模型总长47.4 m,其中头车和尾车各长11.2 m,中间车厢长25.0 m。列车模型高3.1 m,宽3.2 m。简化后的模型如图4所示。

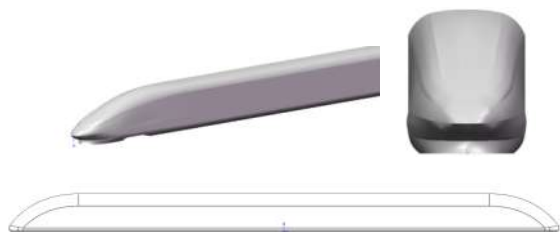


图4 简化后的列车模型

Fig. 4 Simplified train model

风屏障的长度 L 为32.0 m,双侧直立式风屏障的厚度为0.1 m,高度为4.0 m,风屏障离地高度为0.0 m,列车的离地高度为0.45 m。本文动车组的设计车速为250 km/h,CFD模型示意图见图5。

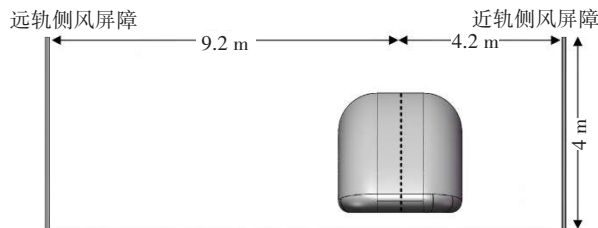


图5 列车与风屏障示意图

Fig. 5 Schematic diagram of train and wind barrier

在数值模型中,本文重点对风屏障壁面及列车近壁区等高梯度流动区域实施局部加密处理,同时在远离研究对象的计算域外围采用渐进式稀疏网格以平衡计算效率。根据文献[13]的网格划分准则,车体表面网格为正六边形,将其导入速度文件来控制列车的移动速度。依据网格独立性验证结果(图6),采用320万 Poly-Hexcore 网格来捕捉壁面的流动特征。图7为风屏障、列车网格划分图。

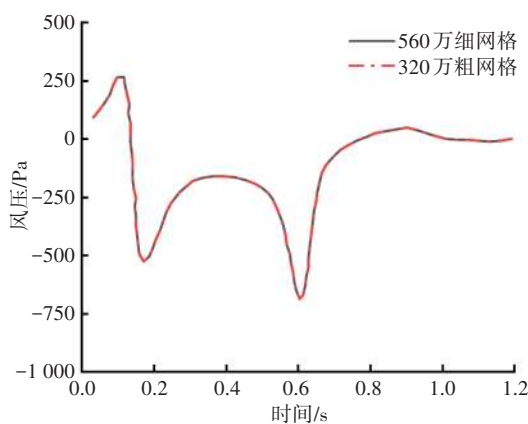


图6 不同网格量下风屏障压力时程曲线

Fig. 6 Pressure time history curves for wind barrier with different grid quantities

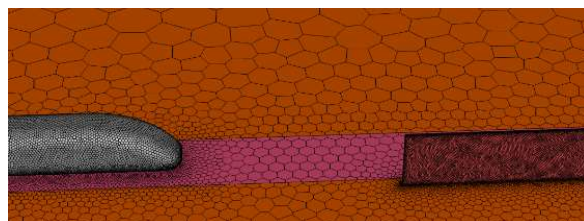


图7 风屏障、列车网格

Fig. 7 Grids of wind barrier and train

针对列车穿越风屏障的模拟工况,本文将风屏障来流侧的外域边界设置为压力入口,其余外域边

界则定义为压力出口,相关设置方案详见图8。最后采用Fluent中的SST $k-\epsilon$ 湍流模型进行瞬态求解,计算出列车速度为400 km/h、轨旁中心距为3.8 m时列车的脉动风时程曲线,如图9所示。

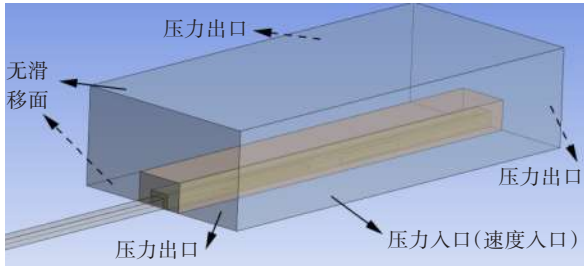


图8 压力边界的设定

Fig. 8 Setting of pressure boundary

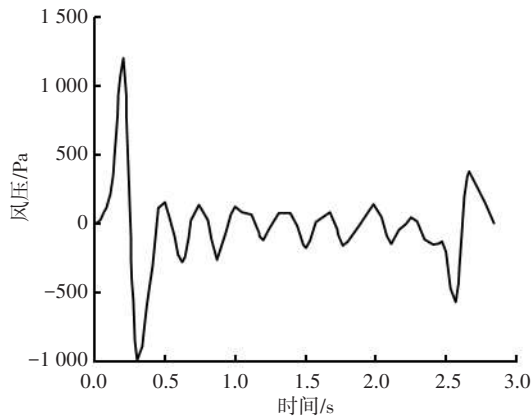
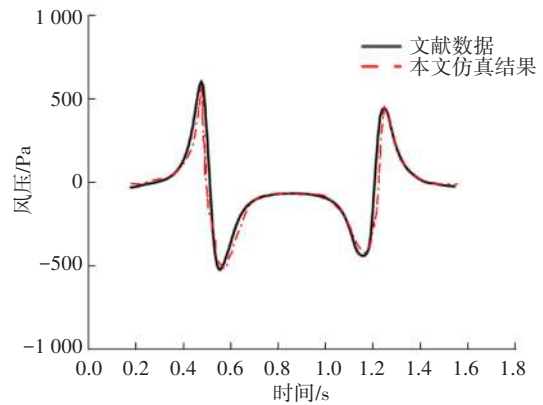


图9 列车的脉动风时程曲线

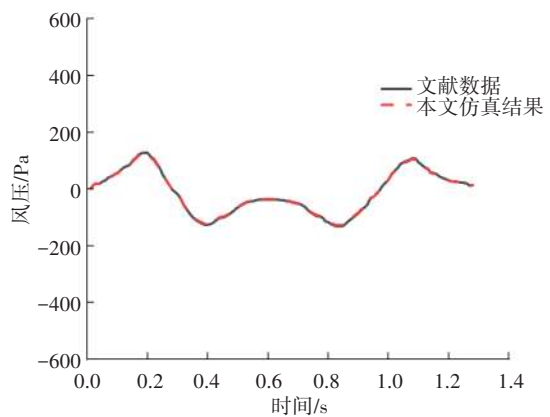
Fig. 9 Fluctuating wind time history curve of train

1.2.2 CFD 模型验证

德国学者^[14]开展了系统的现场测试与数值模拟研究,该研究重点考察了ICE3型列车以300 km/h速度通过混凝土和金属材质声屏障时气动压力的分布特征,获取了轨道中心至声屏障的距离为3.8 m时的脉动风压时程曲线,并建立了相应的计算方法。本研究的仿真参数与实测工况的相同,方便进行实测数据与仿真结果的对比分析。图10(a)给出了本文仿真结果与文献[14]中实测数据的对比。从图10(a)可以看出,数值模拟结果与实测数据具有良好的一致性,但仿真结果未完全再现实测数据的细微波动,原因可能是数值模型对受电弓系统和转向架等复杂结构进行了简化处理。此外,对比了文献[15]在列车速度为350 km/h时远轨侧声屏障距单元板底部0.75 m处测点的风压时程曲线,见图10(b)。由图10(b)可以发现,本文采用的数值方法具有较高的精度,能够有效预测列车表面风压的动态分布。



(a) 与文献[14]数据的对比



(b) 与文献[15]数据的对比

图10 本文仿真结果与文献数据的对比

Fig. 10 Comparison between simulation results of this paper and data from relevant literature

2 有限元模拟

2.1 模型的建立

在ABAQUS软件中建立50跨风屏障有限元模型,每跨风屏障单元由2个“H”形钢立柱、4块铝合金单元板以及4个防震橡胶垫组成。铝合金单元板宽2 m,长4 m,厚127 mm;“H”形钢的型号为HW175×175,“H”形钢立柱高4 m,相邻“H”形钢立柱之间的距离为2 m;防震橡胶垫高4 m,长83.75 mm,宽13.00 mm。对有限元模型做如下简化:1)忽略风屏障铝合金单元板上的孔隙;2)钢立柱与底端的固定桩为一体,采用相同的材料;3)在“H”形钢立柱中未设置倒角,“H”形钢立柱与铝合金单元板之间的空隙直接用防震橡胶垫填充。

根据桥梁金属风屏障通环(2009)8323(图集)A可知,“H”形钢立柱以及钢立柱底端的固定桩的材料采用Q235-B级碳素结构钢;铝合金单元板的材料

标号为5A03。表1为风屏障各部件的材料参数。橡胶垫在ABAQUS软件中属于超弹性材料,其参数设定参考文献[16]。设置“H”形钢立柱底部为固定桩全约束,风屏障翼缘与防震橡胶垫的两个接触面为“Tie”绑定约束,铝合金面板与防震橡胶垫的两个接触面也为“Tie”绑定约束。由于风屏障自身质量较大,需要设置风屏障的质量。经收敛性分析后确定立柱网格尺寸为10 mm×10 mm,面板网格尺寸为30 mm×30 mm。风荷载按上文计算所得施加在铝合金单元板及“H”形钢立柱上。风屏障模型示意图见图11。

表1 风屏障各部件的材料参数

Table 1 Material parameters of each component of wind barrier

部件	材料	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松 比	屈服极 限/MPa	强度极 限/MPa
“H”形 钢立柱	Q235- B	7 830	210	0.274	235	441
铝合金 单元板	复合 材料	203	70	0.330	80	175

注:各部件材料的性能均符合对应国标

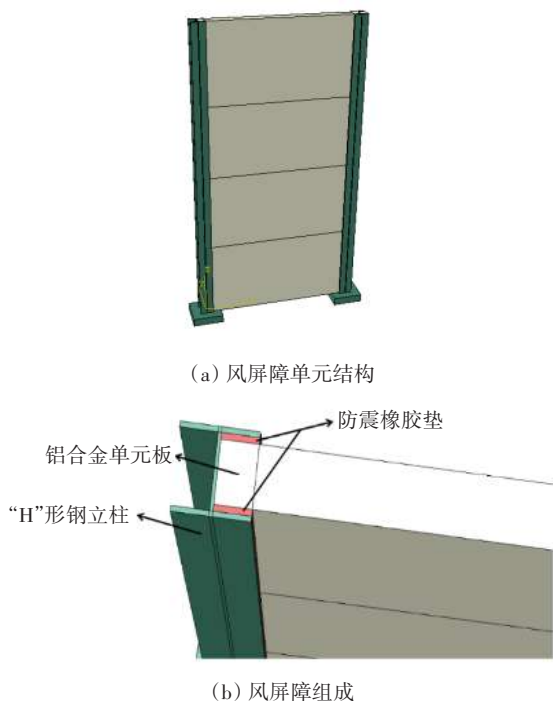


图11 风屏障模型示意图

Fig. 11 Schematic diagram of wind barrier model

建立考虑表面形貌的锈蚀风屏障有限元模型是数值模拟的难点,目前大部分锈蚀的影响通过削弱构件厚度^[17]或者采取圆柱形蚀坑^[18]考虑。有学者在对蚀坑生长形状的研究中发现,在与海水成分

类似的盐溶液中,蚀坑主要呈半椭球状^[19-20],故本文采取半椭球形蚀坑来模拟锈蚀的影响。通过前期预分析可知,风屏障主要的承力结构为“H”形钢立柱,且锈蚀一般发生在立柱底部。故对“H”形钢立柱底部进行锈蚀处理。综合考虑计算时间与精确程度,设置全局网格尺寸为0.4 mm×0.4 mm,在蚀坑处进行局部加密(网格尺寸为0.1 mm×0.1 mm),边界条件、荷载及材料属性等与未锈蚀模型保持一致。图12为蚀坑仿真图。

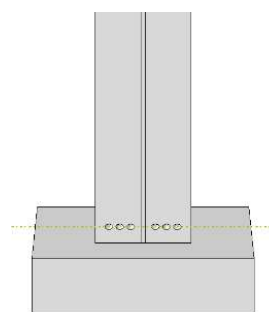


图12 蚀坑仿真图

Fig. 12 Pit simulation diagram

2.2 模型验证

为了保证有限元模拟的准确性,风屏障尺寸参数、材料参数、荷载、边界条件等与文献[21]保持一致。图13给出了风屏障的应力云图,有限元模拟与文献[21]中特征频率和特征值的对比见表2。

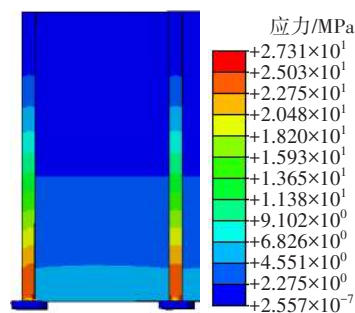


图13 风屏障的应力云图

Fig. 13 Stress cloud diagram of wind barrier

表2 有限元模拟与文献[21]中特征频率和特征值的对比

Table 2 Comparison of characteristic frequency and eigenvalue between finite element simulation and reference [21]

阶数	有限元模拟		文献[21]	
	特征值	自振频率/Hz	特征值	自振频率/Hz
1	1 458	6.411	1 472.5	6.107 3
2	1 468	6.427	1 499.3	6.162 5
3	1 515	6.530	1 562.2	6.290 5
4	1 591	6.692	1 665.2	6.494 5
5	1 748	6.824	1 808.6	6.768 4

由图13可知,在风屏障有限元模拟结果中,应力最大处位于“H”形钢立柱底部,最大应力为27.31 MPa,与文献[21]中研究结果的最大应力26.38 MPa接近,误差为3.5%。从表2可以看出,有限元模拟与文献[21]中特征值和特征频率的误差均在5%之内,说明了有限元模拟的准确性,在此基础上可进一步分析锈蚀风屏障的疲劳性能。

3 疲劳性能分析

3.1 疲劳参数设置

将锈蚀构件有限元分析结果导入Fe-safe中进行疲劳寿命分析。采用Fe-safe的Brown Miller-Morrow算法及正弦波荷载谱,设置应力比 $R=-1$,频率为20 Hz,设计寿命为200万次。采用Fe-safe自带的Seeger近似材料法生成材料的 $S-N$ (应力-疲劳寿命)曲线,最后定义材料表面粗糙度。

为了获得不同蚀坑尺寸下风屏障的 $S-N$ 曲线以及各参数对锈蚀风屏障 $S-N$ 曲线的影响规律,本文研究了不同蚀坑深度、宽度、个数、间距对风屏障疲劳寿命的影响,最后将由ABAQUS软件获得的分析结果导入软件Fe-safe中计算疲劳寿命。

表3给出了不同蚀坑特征参数下风屏障的疲劳寿命。从表3可以看出,当蚀坑间距较小时,蚀坑之间的相互作用会加剧风屏障疲劳寿命的下降,但随

着蚀坑间距的继续增加,风屏障疲劳寿命的变化幅度开始变小。

3.2 蚀坑参数分析

本文基于有限元模拟,系统分析了蚀坑深度、宽度、个数、位置及蚀坑间距对风屏障疲劳性能的影响规律。结果表明,各参数对疲劳性能的贡献存在显著差异,蚀坑深度、宽度、位置、个数对风屏障疲劳寿命影响较大,蚀坑间距对风屏障疲劳寿命影响较小,下面重点分析这些参数对风屏障疲劳性能的影响。

图14所示为蚀坑尺寸与风屏障疲劳寿命对数关系曲线。从图14可以看出,风屏障的疲劳寿命随蚀坑深度的增加显著下降。当蚀坑宽度不变、深度增加时,蚀坑形状呈“深窄型”,此时坑底曲率半径较小,导致局部应力梯度显著增大,故风屏障的疲劳寿命有所下降。点蚀试件的疲劳寿命均低于工程要求的 2×10^6 次,证明点蚀对风屏障疲劳寿命的影响较大。风屏障的疲劳寿命随蚀坑宽度的增加不断上升。当蚀坑深度不变、宽度增加时,蚀坑形状呈“浅宽型”,坑底曲率较大,导致应力集中区域从坑底转移,从而延缓了裂纹萌生,提升了疲劳寿命储备,且随着蚀坑宽度的增加,应力集中区域逐渐扩大,应力分布更加均匀,故疲劳寿命不断上升。

图15为不同蚀坑深度下风屏障的应力云图。从图15可以看出,在点蚀深度较浅时,构件的应力

表3 不同蚀坑特征参数下风屏障的疲劳寿命

Table 3 Fatigue life of wind barrier under different characteristic parameters of pits

特征参数	编号	参数值	一致变量	疲劳寿命/次	特征参数	编号	参数值	一致变量	疲劳寿命/次
蚀坑深度 H	H-0	0 mm	$L=10$ mm $n=6$ 个 $W=5$ mm	>10 000 000	蚀坑个数 n	n-1	1 个	$L=10$ mm $H=5$ mm $W=8$ mm	3 708 486
	H-6	6 mm		1 708 958		n-2	2 个		2 122 345
	H-7	7 mm		1 289 928		n-3	3 个		1 823 716
	H-8	8 mm		674 825		n-4	4 个		1 643 850
	H-9	9 mm		43 245		n-5	5 个		625 697
	H-10	10 mm		12 524		n-6	6 个		599 533
蚀坑宽度 W	W-5	5 mm	$L=10$ mm $H=5$ mm $n=6$ 个	22 510	蚀坑间距 L	L-10	10 mm	$H=5$ mm $n=4$ 个 $W=7$ mm	137 362
	W-6	6 mm		50 444		L-15	15 mm		439 232
	W-7	7 mm		225 725		L-20	20 mm		531 333
	W-8	8 mm		578 955		L-25	25 mm		573 732
	W-9	9 mm		9 678 792		L-30	30 mm		531 333
蚀坑位置 WZ	WZ-1	1	$H=5$ mm $n=1$ 个 $W=7$ mm	8 306 207					
	WZ-2	2		5 047 468					
	WZ-3	3		1 217 244					
	WZ-4	4		4 875 860					
	WZ-5	5		1 128 766					

分布相对均匀,构件的几何形态改变较小,应力集中现象不明显;随着点蚀深度的增加,点蚀部位应力集中现象逐渐加剧,其周围区域的应力水平显著升高,应力最大值由蚀坑处转移至翼缘的角点处,而破坏模式未改变,均为局部屈曲破坏。

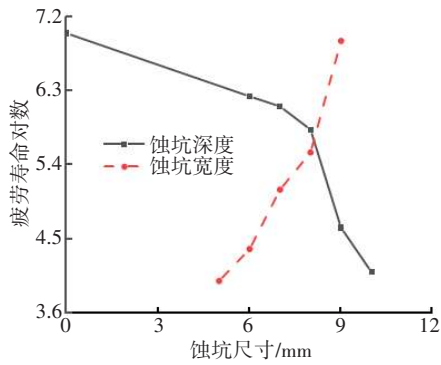


图 14 蚀坑尺寸与风屏障疲劳寿命对数关系曲线
Fig. 14 Relationship curve of pit size and logarithm of fatigue life of wind barrier

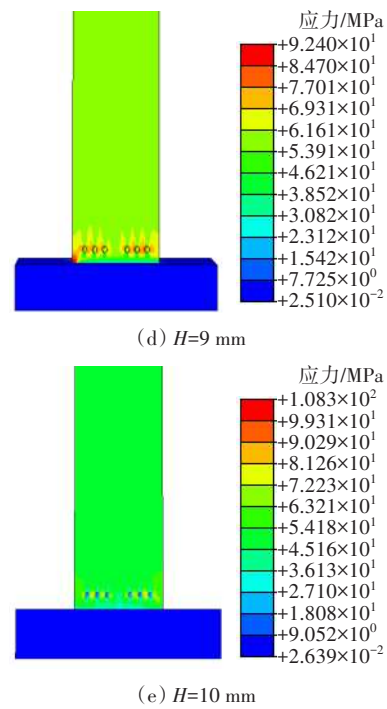
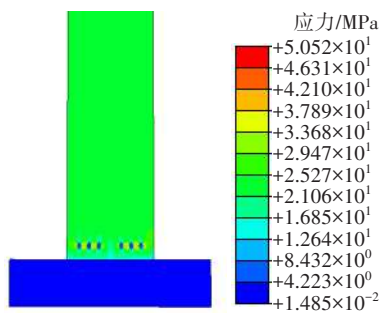
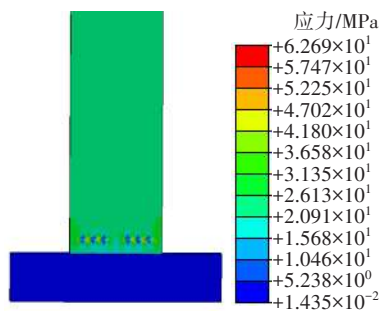


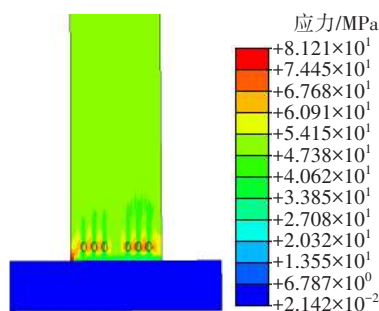
图 15 不同蚀坑深度下风屏障的应力云图
Fig. 15 Stress cloud diagrams of wind barrier under different pit depths



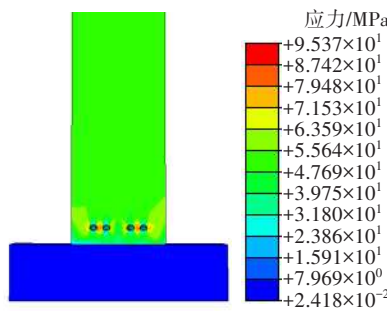
(a) H=6 mm



(b) H=7 mm



(c) H=8 mm



(a) L=10 mm

图 16 为蚀坑间距为 10、30 mm 时风屏障的应力云图。由图 16 可以看出,当蚀坑间距较小时,蚀坑之间存在明显的相互作用,这种相互作用导致蚀坑之间的应力集中区域明显增大,蚀坑间的相互作用与单个蚀坑产生的应力集中效应耦合,对风屏障立柱的承载能力造成了更大的影响,故风屏障的疲劳寿命下降得较快。而随着蚀坑间距的增大,蚀坑之间的相互影响逐渐减弱,单个蚀坑产生的应力集中效应占主导,故应力的变化幅度也有所减小。此外,不同蚀坑间距下风屏障的破坏模式均相同,均为局部屈曲破坏。由上述分析可知,蚀坑间距对疲劳性能的影响不大,这可能是由于在固定蚀坑深宽比下,蚀坑间距调整未改变蚀坑的局部应力场分布,这说明蚀坑几何形态主导风屏障的疲劳性能。

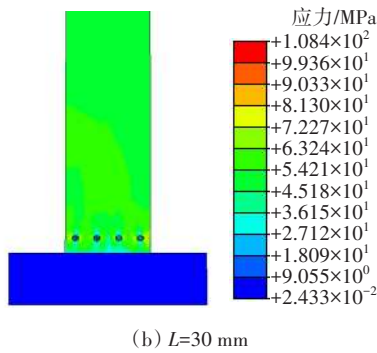


图 16 不同蚀坑间距下风屏障的应力云图

Fig. 16 Stress cloud diagrams of wind barrier with different pit spacing

图 17 给出了蚀坑个数与风屏障疲劳寿命对数关系曲线。从图 17 可以看出,随着蚀坑个数的增加,风屏障的疲劳寿命逐渐减小。多个蚀坑的存在会导致应力集中区域相互叠加,这进一步加剧了材料损伤的累积。当蚀坑个数从 1 个增加到 6 个时,风屏障疲劳寿命的对数从 6.6 下降到 5.7,证明蚀坑个数对风屏障疲劳寿命的影响较大。此外,不同蚀坑个数下风屏障的破坏模式均相同,均为局部屈曲破坏。

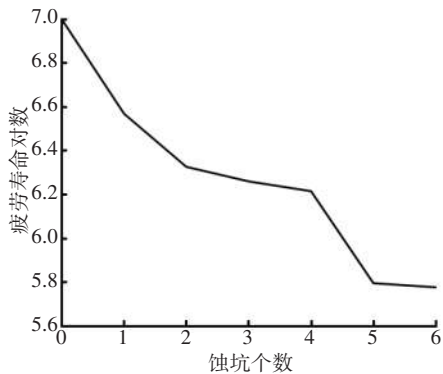
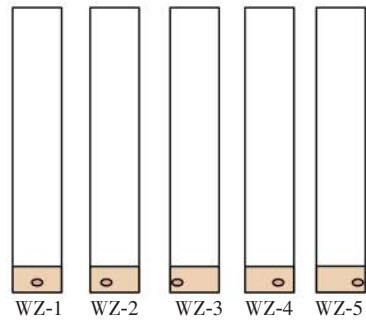


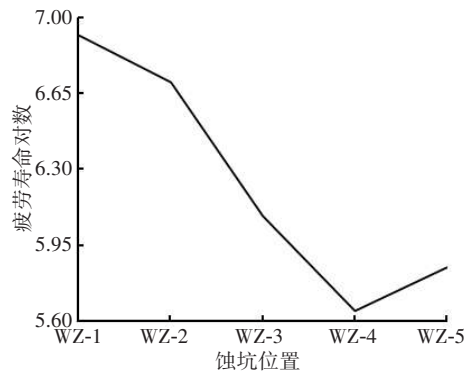
图 17 蚀坑个数与风屏障疲劳寿命对数关系曲线

Fig. 17 Relationship curve of number of pits and logarithm of fatigue life of wind barrier

本文考虑了 5 种不同的蚀坑位置,如图 18(a)所示。图 18(b)给出了蚀坑位置与风屏障疲劳寿命对数关系曲线。从图 18(b)可以看出,当蚀坑位于翼缘的边缘时,风屏障的疲劳寿命明显低于蚀坑位于翼缘中部时的风屏障疲劳寿命,蚀坑位置越靠近两侧风屏障,风屏障的疲劳寿命越短,说明蚀坑位置对风屏障疲劳寿命的影响较大。此外,不同蚀坑位置下风屏障的破坏模式均相同,均为局部屈曲破坏。



(a) 5 种蚀坑位置示意图



(b) 蚀坑位置与疲劳寿命对数关系曲线

图 18 蚀坑位置及其与疲劳寿命对数关系曲线

Fig. 18 Relationship curve of pit position and logarithm of fatigue life of wind barrier

4 寿命评估与预测

4.1 寿命评估

为评估变幅荷载作用下锈蚀风屏障的疲劳寿命,可在 $S-N$ 曲线的基础上,借助 Palmgren-Miner 线性损伤累积理论进行疲劳寿命的预测。

风荷载是随机的,因此风屏障一般在变幅交变应力作用下工作。可通过损伤度(各应力水平下循环次数与该应力水平下材料疲劳寿命的比值之和)相等原则,将变幅循环应力 $\Delta\sigma_i$ 的重复作用(n_i 次循环),转化为常幅应力 $\Delta\sigma_c$ (也称等效应力幅)的重复作用($\sum n_i$ 次循环)。 $\Delta\sigma_c$ 的计算如式(3)所示。

$$\Delta\sigma_c = \left(\frac{\sum n_i \Delta\sigma_i^m}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

式中: m 为双对数坐标系中疲劳寿命曲线斜率的负倒数。

本研究基于雨流计数法原理对锈蚀风屏障进行等效计算,编写代码对“H”形钢立柱底部的应力时程曲线进行处理。这里以 H-6 锈蚀试件为例,

图 19(a)给出了“H”形钢立柱底部的应力时程曲线,图 19(b)为雨流计数法的计算结果。

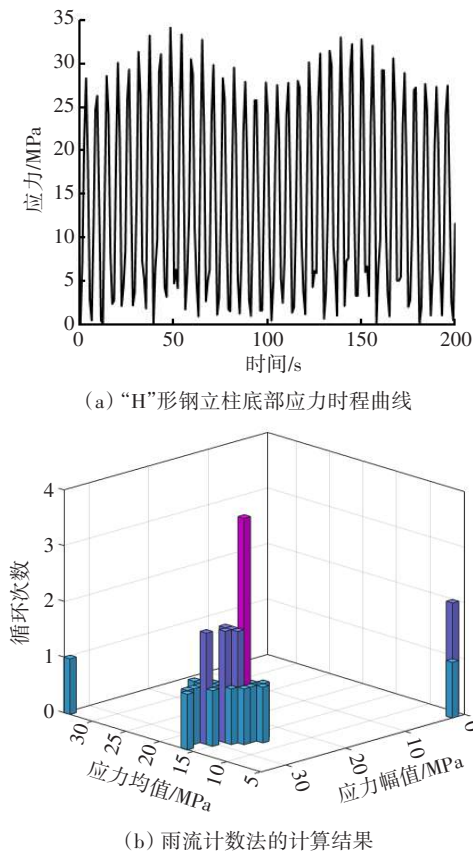


图 19 “H”形钢立柱底部应力分析图

Fig. 19 Stress analysis diagram for H-shaped steel column bottom

结合等效应力幅统计分析方法,计算锈蚀风屏障“H”形钢立柱的等效应力幅,如式(4)所示。根据雨流计数法计算出的应力幅值,结合 3.1 节中的疲劳寿命计算方法,可以拟合出 H-6 试件的 S-N 曲线,再将等效应力幅 $\Delta\sigma_c$ 带入计算出 N。根据线性累积损伤理论,当损伤度 $D=1$ 时,认为风屏障失效。最终可通过式(5)计算出 H-6 试件的使用寿命。

$$\Delta\sigma_c = \left(\frac{\sum n_i \Delta\sigma_i^m}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{m}} \approx 27.3 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$N_x = \frac{1}{D} = \frac{N}{\sum n_i} = 1\,708\,817 \text{ 次} \quad (5)$$

式中: N_x 为等效应力幅下的风屏障使用寿命。

根据桥梁金属声屏障通环(2009)8323(图集)A 规定,设计每天 210 对列车通过,若 1 a 按 365 d 计,则 H-6 试件的使用寿命 N_y 为:

$$N_y = \frac{N_x}{365 \times 210} \approx 22 \text{ a} \quad (6)$$

可以看出,当风屏障立柱底部发生锈蚀时,立柱的使用寿命低于设计寿命 50 a。因此,局部点蚀造成的危害不可忽视,应及时处理^[22-23]。

4.2 使用寿命预测

根据 4.1 节的计算结果可计算出带有不同尺寸蚀坑的风屏障的使用寿命,见表 4。

表 4 带有不同尺寸蚀坑的风屏障的使用寿命

Table 4 Service life of wind barriers with different sizes of pits

编号	损伤度 D	使用寿命/a	编号	损伤度 D	使用寿命/a
H-0	0	50.0	n-1	2.697×10^{-7}	48.0
H-6	5.850×10^{-7}	22.0	n-2	4.712×10^{-7}	28.0
H-7	7.752×10^{-7}	17.0	n-3	5.483×10^{-7}	24.0
H-8	8.523×10^{-7}	15.3	n-4	6.08×10^{-7}	21.0
H-9	9.772×10^{-7}	13.0	n-5	1.598×10^{-6}	8.0
H-10	1.523×10^{-6}	9.0	n-6	2.640×10^{-6}	5.0
W-5	1.727×10^{-6}	8.0			
W-6	1.342×10^{-6}	10.0			
W-7	1.101×10^{-6}	12.0			
W-8	9.330×10^{-7}	14.0			
W-9	5.442×10^{-7}	24.0			

由上文分析可知,蚀坑长度、宽度、个数对风屏障疲劳寿命的影响较大,故引入损伤参量——锈蚀率 η 作为整合蚀坑几何特征的关键参数,量化表征风屏障锈蚀损伤程度。定义 η 为所有蚀坑总体积与风屏障“H”形钢立柱底部锈蚀区体积的比值,即:

$$\eta = \frac{V_n}{V} \quad (7)$$

式中: V_n 为所有蚀坑体积之和; V 为“H”形钢立柱底部锈蚀区体积。

单个蚀坑的体积 V_1 按半椭球体的体积公式计算:

$$V_1 = \frac{2}{3} \pi H W^2 \quad (8)$$

当存在 n 个蚀坑时, $V_n = n V_1$ 。

基于表 3 中的蚀坑参数和表 4 中的使用寿命数据,计算各工况下的锈蚀率,根据非线性最小二乘法最终建立锈蚀率与疲劳寿命的关系。图 20 给出了锈蚀率与风屏障使用寿命的散点拟合图,拟合公式为:

$$N_y = 52.3e^{-4.2\eta} + 0.8 \quad (9)$$

从图 20 可以看出,拟合公式的决定系数为 0.909 8,说明拟合效果较好。设某风屏障立柱底部的锈蚀率 $\eta=0.4\%$,将其代入式(9)中,得 $N_y \approx$

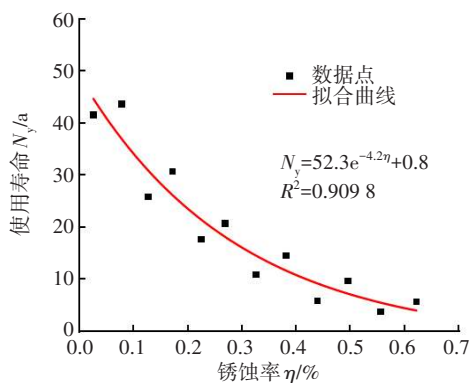


图20 锈蚀率与风屏障使用寿命的散点拟合图

Fig. 20 Scatter fitting diagram of corrosion rate and service life of wind barrier

$52.3e^{-4.2 \times 0.4} + 0.8 \approx 10.5$ a, 与表4中W-6试件使用寿命的误差在10%以内,证明拟合公式的预测精度较高。

5 结论

本文以沿海地区风屏障为研究对象,通过数值模拟与理论分析相结合的方法,系统探究了局部点蚀与疲劳荷载耦合作用下风屏障疲劳性能的退化规律及使用寿命的评估方法,得出的主要结论如下:

1) 基于谐波叠加法建立的随机脉动风时程模型可准确反映不同高度处风压的动态特性,其功率谱与Davenport谱吻合度较高;结合CFD技术构建了车致脉动风模型,并用实测数据验证了该模型的可靠性。

2) 锈蚀风屏障疲劳寿命与蚀坑参数关系密切:“深窄型”蚀坑会加剧局部应力的集中,“浅宽型”蚀坑可使应力集中区域分散;多个蚀坑应力集中的叠加效应会显著降低疲劳寿命,蚀坑间距对疲劳寿命影响较小。

3) 半椭圆形蚀坑通过改变局部应力集中特征主导疲劳性能演化:蚀坑深度、宽度、个数通过调整应力集中强度影响疲劳寿命,蚀坑位置通过改变应力集中路径产生作用,蚀坑间距未改变局部应力场分布,其影响可忽略。所有工况下风屏障的破坏模式均为局部屈曲破坏,应力最大值随蚀坑深度的增加从坑底转移至翼缘角点处。

4) 基于Palmgren-Miner理论对锈蚀风屏障进行了寿命评估,并建立了锈蚀风屏障使用寿命的预测公式,为锈蚀风屏障的抗疲劳设计与服役寿命评估

提供了理论依据。

参考文献(References):

- [1] 张田,郭薇薇,杜宪亭.车致脉动力作用下桥上防风屏障的振动响应分析[J].铁道建筑,2015,55(3):5-8,11. DOI:10.3969/j.issn.1003-1995.2015.03.02. HANG Tian, GUO Weiwei, DU Xianting. Analysis of vibration response of bridge's wind barrier to fluctuating force induced by train running [J]. Railway Engineering, 2015, 55 (3) : 5-8, 11. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2015.03.02.
- [2] 安桂萍.风区铁路沿线防风屏障结构静动力分析[D].大连:大连海事大学,2015. AN Guiping. Static and dynamic design of wind barrier along the railway in wind area [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015.
- [3] 张田,姚常伟,王佳鑫,等.列车风作用下桥上防风屏障的疲劳性能分析[J].铁道建筑,2018,58(8):45-49. DOI:10.3969/j.issn.1003-1995.2018.08.12. ZHANG Tian, YAO Changwei, WANG Jiabin, et al. Fatigue performance analysis for windproof barriers on bridges under train-induced wind load [J]. Railway Engineering, 2018, 58 (8) : 45-49. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.08.12.
- [4] WU X P, ZHU Y, XIAN L X, et al. Fatigue life prediction for semi-closed noise barrier of high-speed railway under wind load [J]. Sustainability, 2021, 13 (4) : 2096. DOI:10.3390/su13042096.
- [5] COMER A, LOONEY L. Corrosion and fatigue characteristics of positively polarised Zeron 100 base & weld metal in synthetic seawater [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28 (8) : 826-834. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.11.012.
- [6] KOVALOV D, FEKETE B, ENGELHARDT G R, et al. Prediction of corrosion fatigue crack growth rate in alloys (Part I: general corrosion fatigue model for aerospace aluminum alloys) [J]. Corrosion Science, 2018, 141: 22-29. DOI:10.1016/j.corsci.2018.06.034.
- [7] HAN Z Y, HUANG X G, CAO Y G, et al. A nonlinear cumulative evolution model for corrosion fatigue damage [J]. Journal of Zhejiang University (Science A), 2014, 15(6): 447-453. DOI:10.1631/jzus.A1300362.
- [8] 王春生,李熙,吴一凡.服役斜拉索钢丝剩余疲劳强度与剩余寿命试验研究[J].工程力学,2026,43(1):207-218. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2023.07.0501. WANG Chunsheng, LI Xi, WU Yifan. Experimental study on remaining fatigue strength and remaining fatigue life of existing stay cable wires [J]. Engineering Mechanics, 2026, 43 (1) : 207-218. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2023.07.0501.
- [9] 黄侨,朱志远,任远,等.基于车辆荷载模型的斜拉索索力随机模拟及疲劳分析[J].长安大学学报(自然科学版)

- 学版), 2021, 41(2): 12-22. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.02.002.
- HUANG Qiao, ZHU Zhiyuan, REN Yuan, et al. Cable force simulation and fatigue analysis for stay cable based on traffic load model[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41(2): 12-22. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.02.002.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [11] 陈兴, 张毅超, 陈迎庆, 等. 我国高速铁路声屏障气动效应研究与探索[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(4): 84-91. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2023.04.08.
- CHEN Xing, ZHANG Yichao, CHEN Yingqing, et al. Research and exploration of aerodynamic effect of high-speed railway sound barrier in China[J]. China Railway Science, 2023, 44(4): 84-91. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2023.04.08.
- [12] 黎苏, 黎明, 刘庚非, 等. 声屏障几何形状对高速列车气动噪声影响的数值模拟及降噪研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(3): 129-136. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2020.03.15.
- LI Su, LI Ming, LIU Gengfei, et al. Numerical simulation on aerodynamic noise and reduction effect of sound barriers with different geometric shapes for high-speed train[J]. China Railway Science, 2020, 41(3): 129-136. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2020.03.15.
- [13] TOMASINI G, GIAPPINO S, CORRADI R. Experimental investigation of the effects of embankment scenario on railway vehicle aerodynamic coefficients[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 131: 59-71. DOI: 10.1016/j.jweia.2014.05.004.
- [14] MATTHIAS S, ZICHARD B, MUELLER B. Noise barrier for high speed railway[R]. Beijing: Germany Planning Engineering Consulting+Services Ltd., 2007.
- [15] 何轩逸. 桥上高速铁路声屏障在不同荷载作用下的动力响应分析[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- HE Xuanyi. Analysis of dynamic response of high-speed railway noise barrier on bridge under different loads[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [16] 周美吉. 瞬态风和列车风耦合下风屏障的结构性能分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2021.
- ZHOU Meiji. Structural performance analysis of wind barriers under coupling of transient wind and train wind[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2021.
- [17] 韩溥禄, 王根会. 均匀腐蚀下钢底板波形钢腹板组合梁疲劳损伤分析[J]. 桥梁建设, 2025, 55(2): 73-79. DOI: 10.20051/j.issn.1003-4722.2025.02.010.
- HAN Pulu, WANG Genhui. Fatigue damage analysis of composite girder with steel bottom plate and corrugated steel webs under uniform corrosion[J]. Bridge Construction, 2025, 55(2): 73-79. DOI: 10.20051/j.issn.1003-4722.2025.02.010.
- [18] 王慧婷, 王金, 张岳林, 等. 单点腐蚀船体板剩余疲劳寿命的数值计算[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(13): 5-8, 13. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2021.07.002.
- WANG Huiting, WANG Jin, ZHANG Yuelin, et al. Numerical calculation of the residual fatigue life of a hull plate with pit corrosion[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(13): 5-8, 13. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2021.07.002.
- [19] 刘德让, 刘刚, 唐鑫彤, 等. 考虑点蚀损伤的系泊锚链极限强度分析[J]. 中国造船, 2024, 65(1): 75-85. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2024.01.007.
- LIU Derang, LIU Gang, TANG Xintong, et al. Ultimate strength analysis of mooring anchor chains considering pitting damage[J]. Shipbuilding of China, 2024, 65(1): 75-85. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2024.01.007.
- [20] ERNST P, NEWMAN R C. Pit growth studies in stainless steel foils, I: introduction and pit growth kinetics[J]. Corrosion Science, 2002, 44(5): 927-941. DOI: 10.1016/S0010-938X(01)00133-0.
- [21] 杜礼明, 卞晨杰, 周美吉. 突变风与列车风耦合气动载荷下风屏障的强度分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11375-11384. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2023.26.036.
- DU Liming, BIAN Chenjie, ZHOU Meiji. Strength analysis of wind barrier under aerodynamic load coupled with abrupt wind and train wind[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(26): 11375-11384. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2023.26.036.
- [22] 殷新锋, 汤胜, 张明, 等. 腐蚀钢丝应力及疲劳寿命数值模拟研究[J]. 交通科学与工程, 2026, 42(1): 73-79. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20221201003.
- YIN Xinfeng, TANG Sheng, ZHANG Ming, et al. Numerical simulation of stress and fatigue life of corroded steel wire[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2026, 42(1): 73-79. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20221201003.
- [23] 许抄安, 杨盈, 曾懿, 等. 不同形貌蚀坑位置对应力强度因子的影响研究[J]. 公路与汽运, 2025, 41(3): 118-121, 127. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2025.03.020.
- XU Chaoan, YANG Ying, ZENG Yi, et al. Study on the influence of positions of pits with different topography on stress intensity factors[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(3): 118-121, 127. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2025.03.020.

(责任编辑:石月珍;校对:薛仪)