

# 竖向和横向地震载荷对某 1.5 MW 风力机塔筒裂尖应变场的影响及其对比

杨杰<sup>1</sup> 袁宏伟<sup>1,2</sup> 郭国亮<sup>3</sup> 崔巍<sup>1</sup> 陈浩峰<sup>4</sup>

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

(2. 安徽容知日新科技股份有限公司, 合肥 230088)

(3. 延锋汽车智能安全系统有限责任公司, 上海 201315)

(4. 华东理工大学承压系统与安全教育部重点实验室, 上海 200237)

**摘要:** 以含不同初始裂纹长度的某 1.5 MW 风力机塔筒为研究对象, 对其分别施加竖向和横向地震载荷, 每种地震载荷均包含 4 个地震烈度和 3 个实际地震震级。针对竖向和横向地震载荷对风力机塔筒裂尖应变场的影响进行研究与对比。结果表明, 无论是在竖向还是在横向地震载荷下, 随着地震烈度的增加, 裂尖等效塑性应变面积均增加, 但在横向地震载荷下, 裂尖等效塑性应变面积增加更为快速。在 VI 和 VII 级地震烈度下, 竖向地震载荷较横向地震载荷带来的影响更大; 随着地震烈度的增加, 在 VIII 和 IX 级地震烈度下, 横向地震载荷带来的影响急剧增加, 远超过竖向地震载荷的影响。竖向实际地震载荷对裂尖等效塑性应变面积的影响与震级和地震加速度时程曲线有关, 横向实际地震载荷对裂尖等效塑性应变面积的影响与地震加速度时程曲线有关。

**关键词:** 竖向地震载荷; 横向地震载荷; 地震烈度; 实际地震; 裂尖应变场; 风力机塔筒

**中图分类号:** TH114; O346 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.04.007

## 0 引言

近年来, 随着我国能源结构的逐渐调整, 风电作为一种清洁、高效、无污染的新能源得以迅速发展, 以风能等清洁能源为支撑的新型能源体系逐步建立<sup>[1]</sup>。风力发电机支撑系统由风力机塔筒和基座组成, 其中塔筒主要负责支撑叶片和机舱等装置。风力机塔筒是典型的轻薄壁高耸结构, 其结构本身就超越弹性极限接近破坏, 加之底部门洞的存在, 使其处于强度削弱状态。在载荷作用下, 塔筒门洞处很容易产生裂纹, 最终导致破坏<sup>[2]</sup>。国内外均发生了多起风力机塔筒遭受破坏的事故<sup>[3]</sup>。

地震是群祸之首, 是对人类生命财产破坏最严重的自然灾害之一<sup>[4]</sup>。地震对塔筒这种高耸结构的危害更为严重, 塔筒会因受到地震载荷的作用而发生倾覆倒塌<sup>[5]</sup>。地震包含竖向地震和横向地震两个分量, 横向地震一直被认为在地震中起着关键作用; 但近年来全球范围内所发生的强烈地震中, 竖向地震也带来了严重影响。大量的地震现象表明, 竖向地震在结构的损伤中同样扮演着重要角色<sup>[6-8]</sup>, 强烈的竖向地震载荷

会使材料产生高应变速率, 并在材料应力集中处产生突变, 进而对材料的力学行为产生影响<sup>[9]</sup>。

针对地震载荷对风力机塔筒力学行为的影响, 学者们已进行了一些研究。祝磊等<sup>[10]</sup>以塔架模型与完整风力机机组模型为研究对象, 对其在地震载荷下的动力特性进行了研究, 结果表明, 通过有限元法将风力机叶轮和机舱质量集中在塔筒顶部和搭建含叶轮机舱的完整模型时的一阶响应基本相同。SADOWSKI 等<sup>[11]</sup>以某 70 m 高的风力机塔筒为研究对象, 进行了风力机塔筒存在几何缺陷时的地震响应分析, 结果表明, 风力机塔筒对地震作用的敏感性因几何缺陷的存在而显著提高。何玉林等<sup>[12]</sup>通过多柔体联合仿真技术, 以某 2 MW 风力机为对象进行研究, 证明地震载荷会明显影响塔筒的变形。ASAREH 等<sup>[13]</sup>以某 5 MW 风力机为研究对象, 进行了不同风速、地震载荷下风力机的地震响应分析, 结果表明, 风力机的应力状态与风速-地震组合呈非线性相关; 且额定风速-地震组合时, 塔筒底部弯矩幅值最大。宋波等<sup>[14]</sup>采用 Ansys 有限元软件进行建模, 并通过时程分析法得到了不同地震载荷下风力机结构的非线性动态响应规律。

收稿日期: 2023-07-14 修回日期: 2023-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975378, 52375154, 52311530067, 52150710540)

作者简介: 杨杰, 男, 1987年生, 山东菏泽人, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要研究方向为机械强度、断裂力学等; E-mail: yangjie@usst.edu.cn。

引用格式: 杨杰, 袁宏伟, 郭国亮, 等. 竖向和横向地震载荷对某 1.5 MW 风力机塔筒裂尖应变场的影响及其对比[J]. 机械强度, 2025, 47(4): 54-62.

YANG Jie, YUAN Hongwei, GUO Guoliang, et al. Influence and comparison of vertical and horizontal earthquake loads on the crack tip strain field of a 1.5 MW wind turbine tower[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(4): 54-62.

综上所述可以发现,虽然学者们已针对地震载荷下的风力机塔筒进行了一些研究,但是这些研究均针对横向地震载荷,目前尚缺乏对竖向地震载荷下风力机塔筒力学行为的研究。此外,虽然袁宏伟等<sup>[15]</sup>曾针对竖向地震载荷下的异种金属焊接接头进行了研究,但是并没有对竖向地震载荷和横向地震载荷的作用进行对比,而在目前的研究中也尚缺乏类似研究。鉴于此,以某 1.5 MW 风力机塔筒为研究对象,针对竖向和横向地震载荷对风力机塔筒裂尖应变场的影响进行研究,旨在厘清不同地震烈度和不同实际地震载荷对风力机塔筒力学行为的影响,并进一步对竖向、横向地震载荷的影响进行对比。

### 1 风力机塔筒及竖向、横向地震载荷的施加

#### 1.1 风力机塔筒

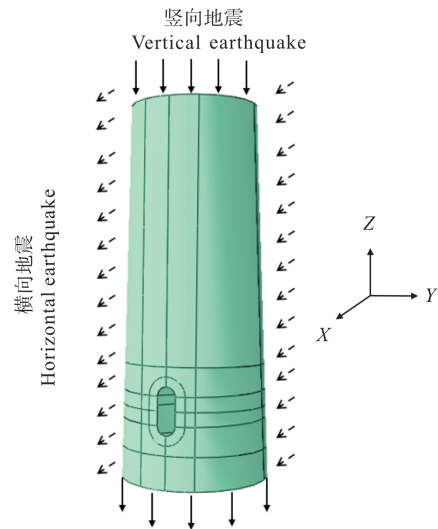
以某 1.5 MW 风力机塔筒为研究对象。塔筒材料为 Q345 钢,其弹性模量为 210 000 MPa,泊松比为 0.3,密度设为 8 242.5 kg/m<sup>3</sup>(实际密度为 7 850 kg/m<sup>3</sup>,考虑梯子、平台、电缆、涂料等,密度需乘以系数 1.05)。其真应力-真应变曲线见文献[16]。塔筒高 76.873 m,采用锥筒式变截面设计,外径随筒高的增加而减小。塔筒共分为 3 段,每段塔筒通过对接法兰用螺栓连接。在数值模拟中,可忽略法兰的厚度,同时简化爬梯、平台、电缆等附属结构。强震来袭前,风力机可提前停止运行并进入紧急停机状态,以避免风-震组合作用对风力机产生更大破坏,因此在研究中仅针对停机状态进行建模分析<sup>[17]</sup>。塔筒的最大应力集中于塔筒底部的门洞及其周围,仅对第 I 法兰段进行分析<sup>[5]65-66</sup>。在对完整的风力机塔筒模型进行极限应力状态分析后,得到第 I 法兰段所受三向应力与三向弯矩,如表 1 所示<sup>[5]66</sup>。其中,以 X 轴垂直于门洞表面向外、Y 轴平行于门洞向右、Z 轴竖直向上为坐标系。

表 1 第 I 法兰段所受载荷

Tab. 1 Loads on the flange section I

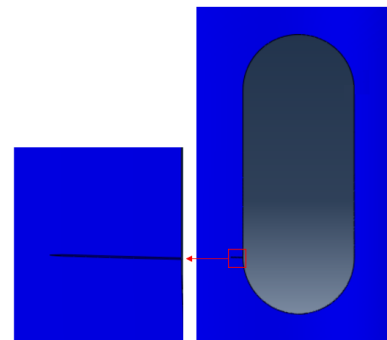
所承载荷 Load borne	值 Value
力矩 Moment $M_{xy}/(kN \cdot m)$	38 070.9
力矩 Moment $M_z/(kN \cdot m)$	672.5
力 Force $F_{xy}/kN$	603.1
力 Force $F_z/kN$	-2 517.3

基于实际风力机塔筒中裂纹产生的位置及不同裂纹位置裂尖塑性应变 (Equivalent Plastic Strain, PEEQ) 的对比,在门洞左下方设置初始裂纹,如图 1 所示。裂纹宽度为 1 mm,设置初始裂纹长度  $a$  分别为 100、200、300、400 mm。



(a) 风力机塔筒第 I 法兰段示意图

(a) Diagram of flange section I of the wind turbine tower



(b) 初始裂纹位置示意图

(b) Diagram of the initial crack location

图 1 风力机塔筒第 I 法兰段及初始裂纹位置示意图

Fig. 1 Diagram of the flange section I of the wind turbine tower and initial crack location

#### 1.2 竖向、横向地震载荷的施加

地震的强弱通常用地震震级和地震烈度来衡量。地震震级是指地震释放能量大小的量级,地震烈度是指某一地区的地面和建筑物遭受地震影响的强弱程度<sup>[18]</sup>。因为地震烈度可以作为地震灾害的简便评估指标,为地震工作者描述地震影响的大小提供一种宏观尺度,所以世界上许多国家一直将地震烈度作为评价地震大小的常用指标<sup>[19]</sup>。地震烈度共分为 12 级<sup>[20]</sup>,其中最常见地震烈度为 VI、VII、VIII 和 IX,所对应峰值加速度分别为 0.05g、0.125g、0.25g 和 0.5g ( $g$  为重力加速度)。但是,在地震发生时,地震大小常用地震震级表示,根据地震时释放的弹性波能量大小来确定。此外,在地震发生时,也可以测得加速度时程曲线。人类记录的第一条地震波 (El-Centro 地震波)、1976 年唐山地震地震波和 2008 年汶川地震地震波的加速度时程曲线如图 2 所示,它们的震级分别是 7.1、7.8 和 8.0 级。

为了研究不同竖向、横向地震载荷对含不同长度

初始裂纹风力机塔筒裂尖应变场的影响,通过质量加速度施加法<sup>[21-22]</sup>对风力机塔筒分别施加4个地震烈度(VI、VII、VIII和IX)和3个实际地震(El-Centro地震、唐山

地震、汶川地震)下的竖向、横向地震载荷,其中竖向地震载荷方向为竖直向下的-Z方向,横向地震载荷方向为垂直于门洞表面向外的X方向,如图1(a)所示。

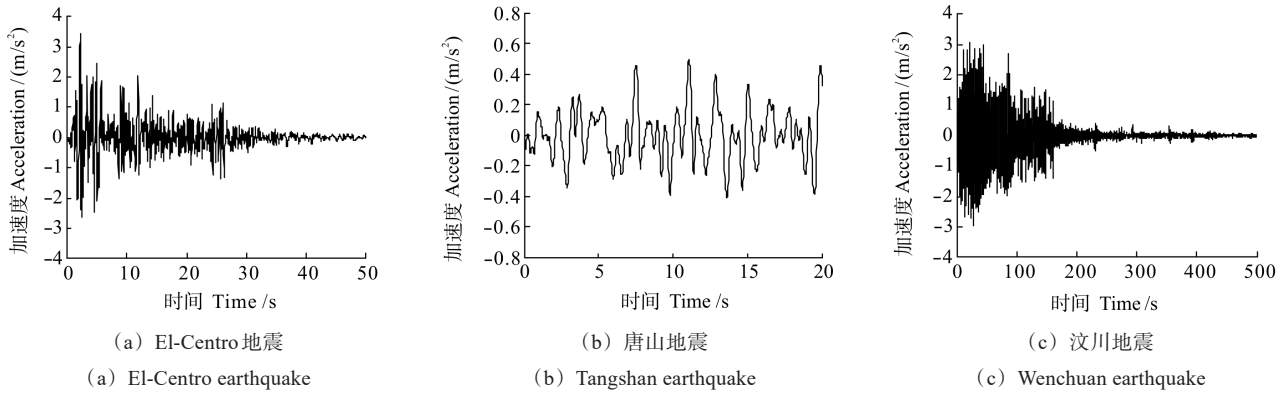


图2 地震的加速度时程曲线

Fig. 2 Acceleration time-history curves of earthquakes

1.3 有限元数值计算

采用Abaqus软件对风力机塔筒第I法兰段进行建模,如图1(a)所示。为了消除网格尺寸的影响,分别设置4种不同的最小网格尺寸(5 mm×5 mm、10 mm×10 mm、25 mm×25 mm、50 mm×50 mm)对模型进行网格无关性分析(网格类型采用8节点三维实体单元C3D8R)。结果表明,当裂尖最小网格尺寸降低至10 mm×10 mm时,应力最大值为 $2.003 \times 10^2$  MPa,并不再因网格尺寸的减小而发生明显变化,如图3所示。因此,本文选用10 mm×10 mm的最小网格尺寸进行有限元数值计算。

典型风力机塔筒整体网格和裂尖局部网格划分如图4所示,该模型共包含86 940个单元。对塔筒施加表1中所列载荷;并分别在竖向、横向两个方向施加第1.2节中地震载荷;同时通过施加重力加速度的方式施加重力载荷。因裂尖等效PEEQ等值线所环绕区域的面积 $A_{PEEQ}$ 可作为统一拘束参数对结构的拘束状态进行表征<sup>[23-24]</sup>,并反映结构拘束相关的断裂韧性<sup>[25]</sup>,故本研究通过有限元数值计算最终得到不同地震载荷下裂尖PEEQ及其等值线所环绕区域的面积 $A_{PEEQ}$ ,作为地震载荷对风机塔筒力学行为影响的参考。

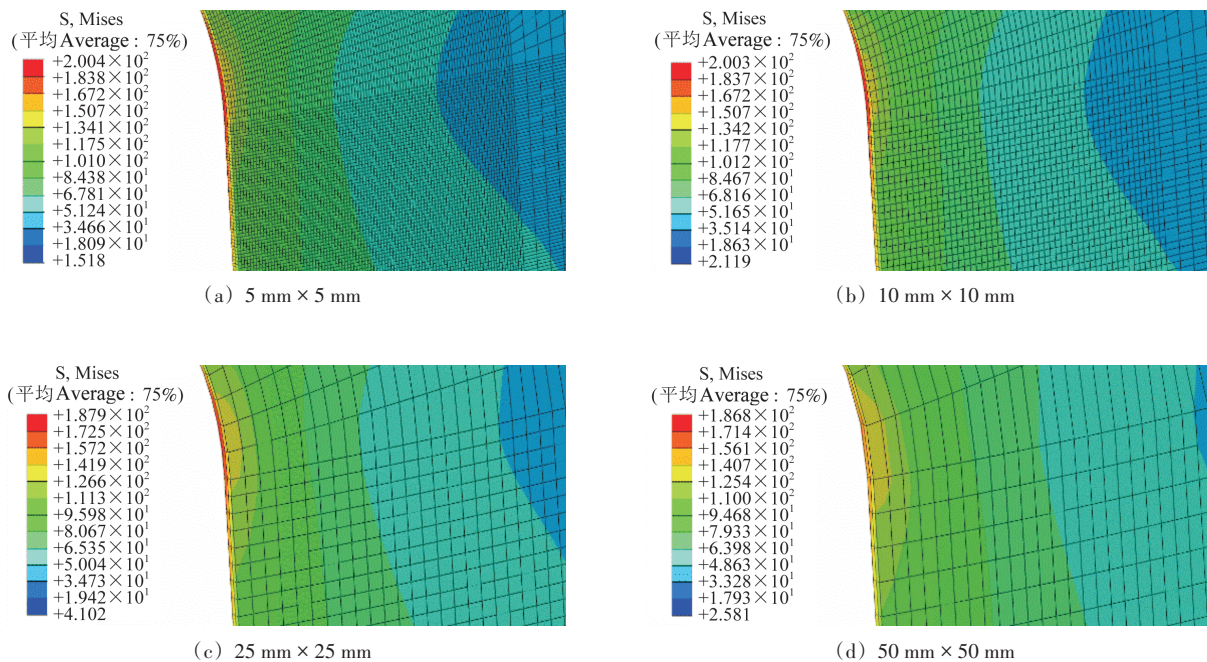
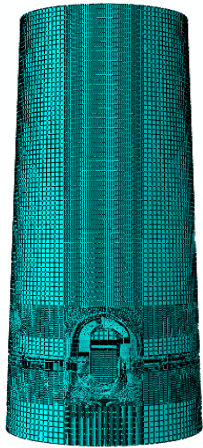


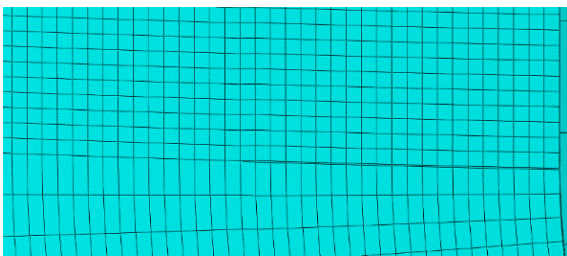
图3 不同最小网格尺寸下风力机塔筒门洞处应力分布图

Fig. 3 Stress distribution diagram of the barrel door in the wind turbine tower under different minimum mesh sizes



(a) 典型风力机塔筒整体网格

(a) Global mesh of the typical wind turbine tower



(b) 裂尖局部网格

(b) Local mesh at the crack tip

图 4 典型风力机塔筒网格

Fig. 4 Mesh of the typical wind turbine tower

## 2 竖向、横向地震载荷对风力机塔筒裂尖应变场的影响及对比

### 2.1 竖向地震载荷对风力机塔筒裂尖应变场的影响

#### 2.1.1 不同地震烈度

当初始裂纹长度为 200 mm 时,在 VI、VII、VIII 和 IX 四种竖向地震烈度下风力机塔筒裂尖 PEEQ 云图如图 5 所示;在 VIII 级竖向地震烈度下,当初始裂纹长度不同时,风力机塔筒裂尖 PEEQ 云图如图 6 所示。

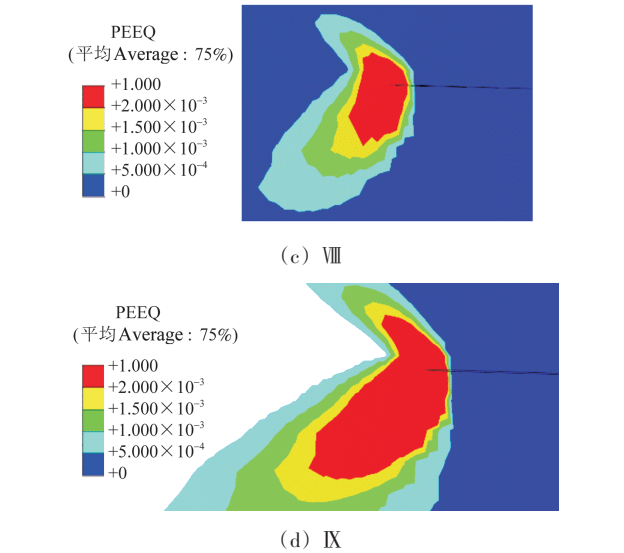
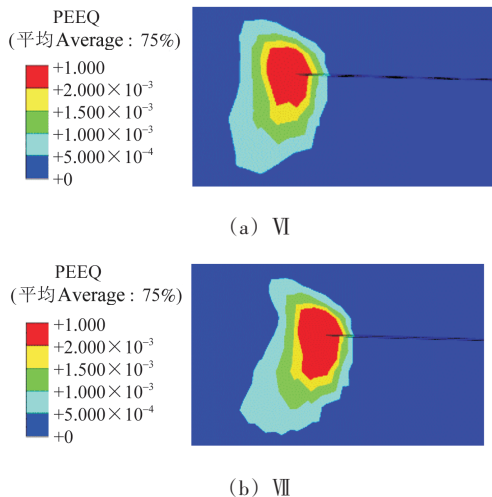


图 5 初始裂纹长度为 200 mm 时不同竖向地震烈度下裂尖 PEEQ  
Fig. 5 PEEQ at the crack tip under different vertical earthquake intensities when the initial crack length is 200 mm

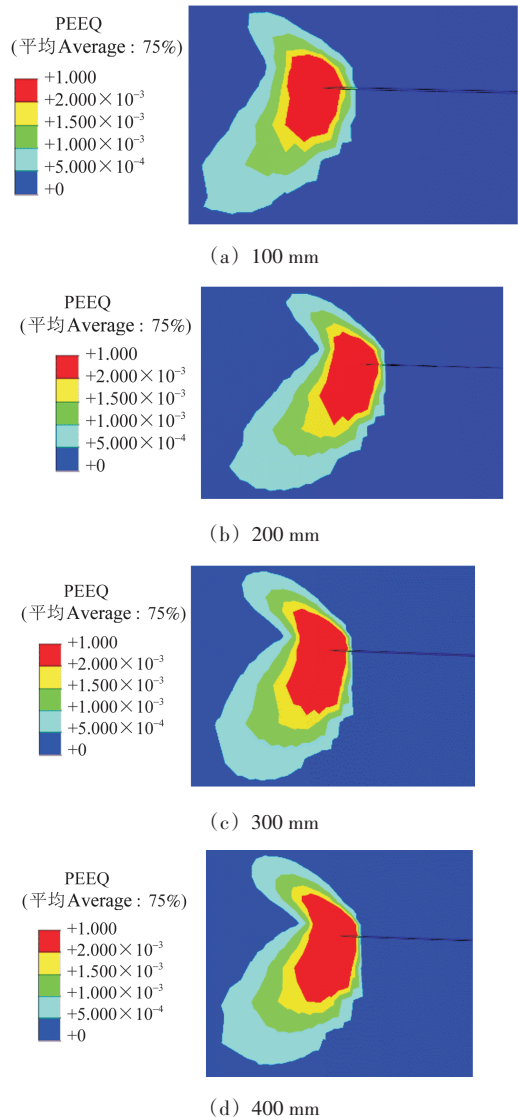


图 6 VIII 级竖向地震烈度下不同初始裂纹长度时裂尖 PEEQ  
Fig. 6 PEEQ at the crack tip under different initial crack lengths when the vertical earthquake intensity is VIII

选取相同的时刻( $t = 1\text{ s}$ ),对 PEEQ 为  $2 \times 10^{-3}$  等值线所围绕区域的面积  $A_{\text{PEEQ}}$  进行计算,如图 7 所示。图 7 清晰地反映了  $A_{\text{PEEQ}}$  随地震烈度和初始裂纹长度变化而变化的趋势。随着地震烈度的增加,  $A_{\text{PEEQ}}$  迅速增加; 随着裂纹长度的增加,  $A_{\text{PEEQ}}$  均匀增加,且在高地震烈度下,  $A_{\text{PEEQ}}$  对裂纹长度的变化更加敏感。

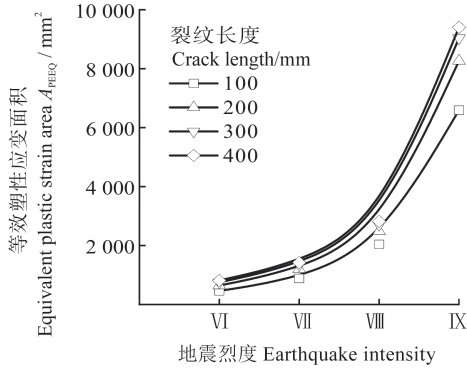


图 7  $t = 1\text{ s}$  时不同竖向地震烈度及不同初始裂纹长度下的  $A_{\text{PEEQ}}$   
 Fig. 7  $A_{\text{PEEQ}}$  under different vertical earthquake intensities and initial crack lengths when  $t = 1\text{ s}$

### 2. 1. 2 不同实际地震载荷

当初始裂纹长度为 100 mm,在 El-Centro 地震、唐山地震和汶川地震 3 种竖向实际地震载荷下风力机塔筒裂尖 PEEQ 云图如图 8 所示。由图 8 可知,汶川地震载荷下 PEEQ 最大、唐山地震载荷下 PEEQ 最小。这一方面与震级有关(汶川地震震级最大),另一方面与地震加速度时程曲线有关(El-Centro 地震加速度时程曲线的最大加速度更大,波动更剧烈)。

## 2. 2 横向地震载荷对风力机塔筒裂尖应变场的影响

### 2. 2. 1 不同地震烈度

当初始裂纹长度为 200 mm,在 VII 和 VIII 两种横向地震烈度下风力机塔筒裂尖 PEEQ 云图如图 9 所示。由图 9 可知,与第 2. 1. 1 节中图 5 竖向地震烈度下一致,随着地震烈度的增加, PEEQ 显著增加。但是,与竖向地震烈度不同的是,在横向地震烈度下, PEEQ 的变化更加显著,呈几何增长。如图 10 所示,在 VI 级地震烈度下, PEEQ 几乎为零,而在 IX 级地震烈度下,门洞两侧及塔筒后方均产生了较大的塑性应变。

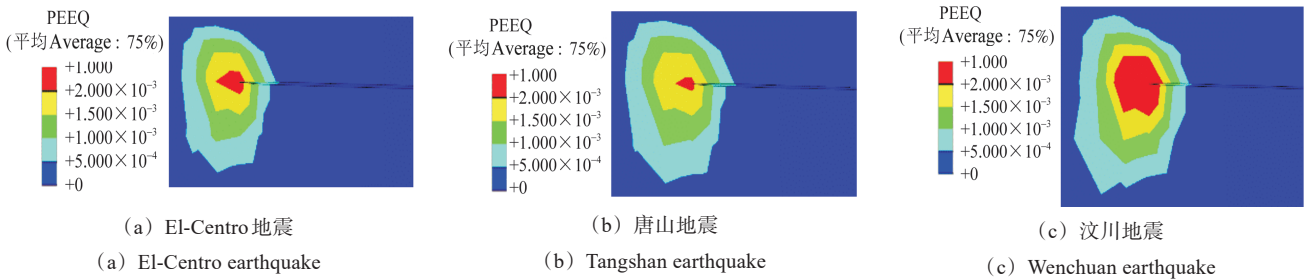


图 8 初始裂纹长度为 100 mm 时不同竖向实际地震载荷下裂尖 PEEQ

Fig. 8 PEEQ at the crack tip under different vertical actual earthquake loads when the initial crack length is 100 mm

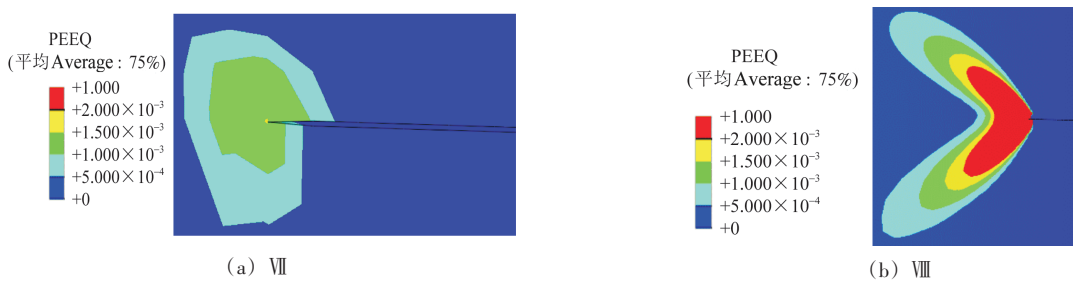


图 9 初始裂纹长度为 200 mm 时不同横向地震烈度下裂尖 PEEQ

Fig. 9 PEEQ at the crack tip under different horizontal earthquake intensities when the initial crack length is 200 mm

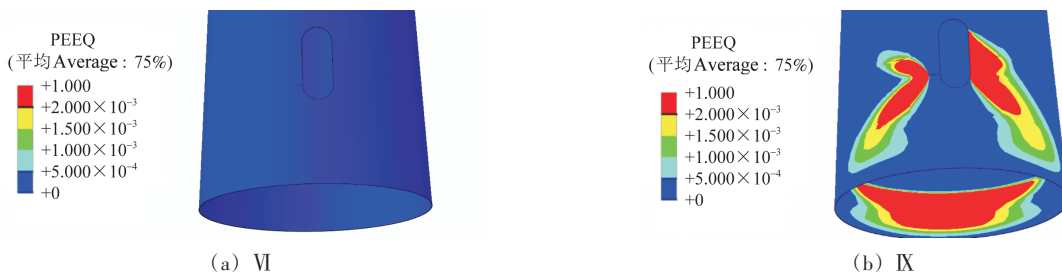


图 10 初始裂纹长度为 200 mm 时 VI 级和 IX 级横向地震烈度下裂尖 PEEQ

Fig. 10 PEEQ at the crack tip under VI and IX horizontal earthquake intensities when the initial crack length is 200 mm

在Ⅷ级横向地震烈度下,当初始裂纹长度不同时,风力机塔筒裂尖PEEQ云图如图 11 所示。由图 11 可知,与第 2.1.1 节中图 6 竖向地震烈度下一致,在横向地震烈度下,随着初始裂纹长度的增加,PEEQ 同样均匀增加。

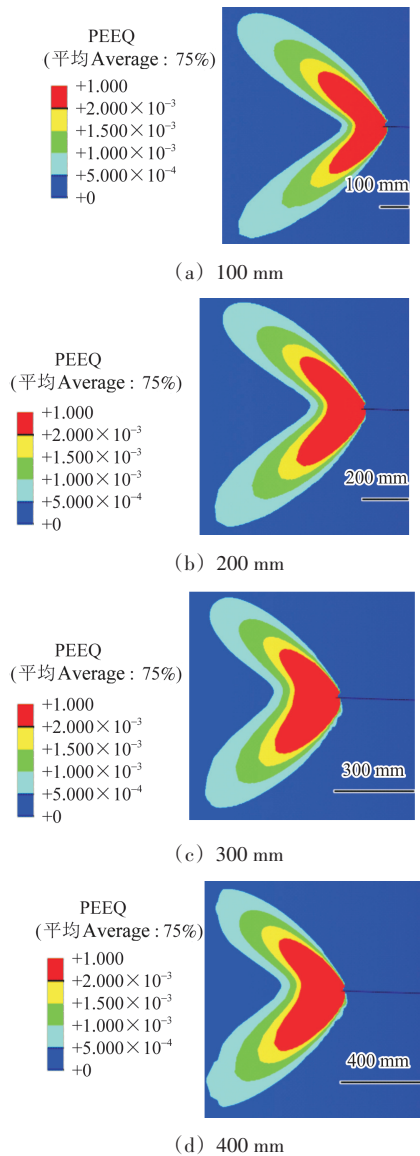


图 11 Ⅷ级横向地震烈度下不同初始裂纹长度时裂尖 PEEQ

Fig. 11 PEEQ at the crack tip under different initial crack lengths when the horizontal earthquake intensity is VIII

同样选取相同的时刻( $t=1\text{ s}$ ),对不同横向地震烈度下 PEEQ 为  $2 \times 10^{-3}$  等值线所围绕区域的面积  $A_{\text{PEEQ}}$  进行计算,如图 12 所示。由图 12 可知,随着地震烈度的增加, $A_{\text{PEEQ}}$  急剧增加;随着裂纹长度的增加,与竖向地震烈度下一致, $A_{\text{PEEQ}}$  均匀增加。

### 2.2.2 不同实际地震载荷

当初始裂纹长度为 100 mm 时,在 El-Centro 地震、唐山地震和汶川地震 3 种横向实际地震载荷下风力机塔筒裂尖 PEEQ 云图如图 13 所示。由图 13 可知,与不

同竖向实际地震载荷加载时 PEEQ 形状相似;不同横向实际地震载荷加载时,裂尖 PEEQ 形状完全不同,且 PEEQ 值相差很大。其中,El-Centro 地震载荷下 PEEQ 最大、唐山地震载荷下 PEEQ 最小。这充分说明横向地震载荷加载时,地震加速度时程曲线对其影响较大。El-Centro 地震加速度时程曲线的最大加速度更大,波动更剧烈,且波动频率更高。

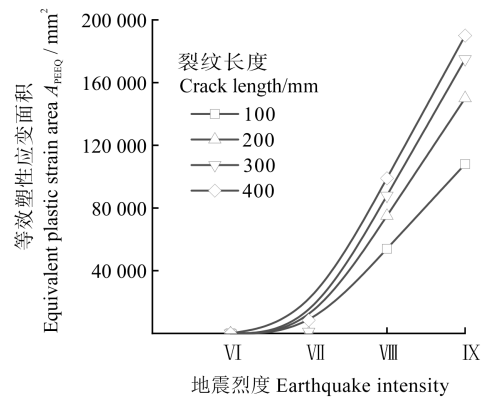


图 12  $t=1\text{ s}$  时不同横向地震烈度及不同初始裂纹长度下的  $A_{\text{PEEQ}}$

Fig. 12  $A_{\text{PEEQ}}$  under different horizontal earthquake intensities and initial crack lengths when  $t=1\text{ s}$

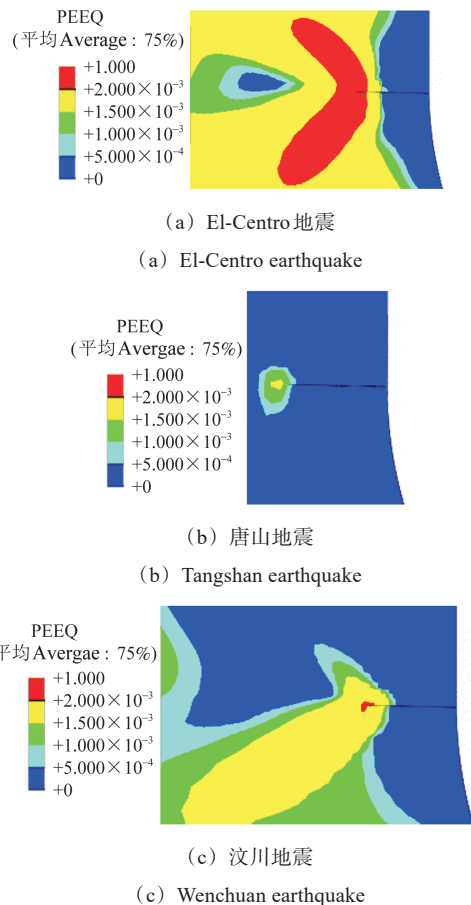


图 13 初始裂纹长度为 100 mm 时不同横向实际地震载荷下裂尖 PEEQ

Fig. 13 PEEQ at the crack tip under different horizontal actual earthquake loads when the initial crack length is 100 mm

### 2.3 竖向、横向地震载荷对风力机塔筒裂尖应变场影响的对比

为直观表达竖向和横向地震载荷对风力机塔筒的影响,将图7、图12中 $A_{PEEQ}$ 转换为对应面积的圆,绘制出不同初始裂纹长度与不同地震烈度下的 $A_{PEEQ}$ 对比图,如图14所示。由图14可知,在VI和VII级地震时,竖向地震载荷带来的影响更大(横向地震载荷带来的影响几乎为0);随着地震烈度的增加,在VIII和IX级地震时,横向地震载荷带来的影响急剧增加,迅速超过竖向地震载荷的影响。以裂纹长度为200 mm为例,IX级地震时,横向地震载荷所引起的裂尖 $A_{PEEQ}$ 可达竖向地震载荷所引起 $A_{PEEQ}$ 的18倍。

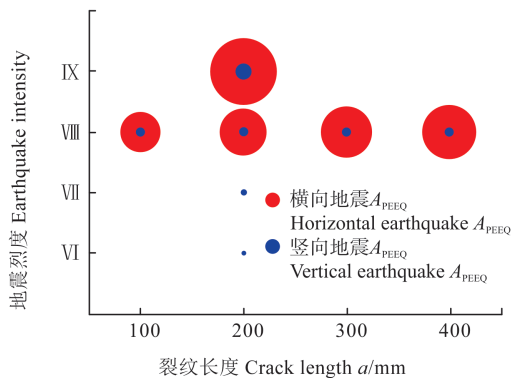


图14 竖向、横向地震载荷对风力机塔筒裂尖应变场影响的对比  
Fig. 14 Comparison of the effects of vertical and horizontal earthquake loads on the strain field at the crack tip of the wind turbine tower

### 3 结论

以含不同初始裂纹长度的某1.5 MW风力机塔筒为研究对象,对其分别施加竖向和横向地震载荷,每种地震载荷均包含4个地震烈度和3个实际地震震级。研究了竖向和横向地震载荷对风力机塔筒裂尖应变场的影响。所得主要结论如下:

1)在竖向地震载荷下,随着地震烈度的增加,裂尖 $A_{PEEQ}$ 迅速增加;随着裂纹长度的增加,裂尖 $A_{PEEQ}$ 均匀增加;且在高地震烈度下, $A_{PEEQ}$ 对裂纹长度的变化更加敏感。实际地震载荷所引起的裂尖 $A_{PEEQ}$ 形状相近,其大小一方面与震级有关,另一方面与地震加速度时程曲线有关。

2)在横向地震载荷下,随着地震烈度的增加,裂尖 $A_{PEEQ}$ 呈几何增长;随着裂纹长度的增加,裂尖 $A_{PEEQ}$ 均匀增加。实际地震载荷所引起的裂尖 $A_{PEEQ}$ 形状完全不同,大小相差很大,这主要与地震加速度时程曲线有关。

3)在VI和VII级地震时,竖向地震载荷较横向地震载荷带来的影响更大;随着地震烈度的增加,在VIII和IX级地震时,横向地震载荷带来的影响急剧增加,迅速超过竖向地震载荷的影响。这也为地震下结构的评定提供了依据。

### 参考文献(References)

- [1] 李昊璋,刘莘元,王锦鸿,等. 我国风电产业的发展现状分析及未来展望[J]. 机电信息,2020(21):91-94.  
LI Haozhang, LIU Pingyuan, WANG Jinhong, et al. Current situation analysis and future prospect of wind power industry in China [J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(21): 91-94. (In Chinese)
- [2] 陈阳. 地震作用下风电塔筒结构动力响应分析[D]. 北京:北京科技大学,2012:18-19.  
CHEN Yang. Study on dynamic response of wind power tower structure under seismic wave [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2012: 18-19. (In Chinese)
- [3] 姚文凡. 风力发电机结构振动监测与预警方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017:2-4.  
YAO Wenfan. Vibration monitoring and early warning method for wind turbine structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 2-4. (In Chinese)
- [4] SARI A M, FAKHRURROZI A. Earthquake hazard analysis methods: a review [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 118: 012044.
- [5] 周思雨,胡挺,余毫,等. 1.5 MW某型现代风力机塔筒强度的有限元分析[J]. 电力科学与工程,2021,37(1):62-71.  
ZHOU Siyu, HU Ting, YU Hao, et al. Finite element analysis on the strength of 1.5 MW modern wind turbine tower [J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(1): 62-71. (In Chinese)
- [6] 谢俊举,温增平,高孟潭,等. 2008年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征[J]. 地球物理学报,2010,53(8):1796-1805.  
XIE Junju, WEN Zengping, GAO Mengtan, et al. Characteristics of near-fault vertical and horizontal ground motion from the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(8): 1796-1805. (In Chinese)
- [7] 唐时军. 结构在竖向地震作用下的振动及其控制研究[D]. 长沙:湖南大学,2007:1-3.  
TANG Shijun. Research on structural vibration and control in vertical earthquake [D]. Changsha: Hunan University, 2007: 1-3. (In Chinese)
- [8] 辛娅云. 竖向地震作用的重要性[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(增刊1):54-56.  
XIN Yayun. Importance of the vertical seismic effect [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2005, 27(Suppl. 1): 54-56. (In Chinese)

- [9] 荆洪阳,霍立兴,张玉凤. 地震载荷下焊接接头断裂行为预测研究[J]. 机械工程学报,2001,37(10):96-99.  
JING Hongyang, HUO Lixing, ZHANG Yufeng. Prediction of fracture behavior on earthquake loading for welded joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(10):96-99. (In Chinese)
- [10] 祝磊,叶桢翔. 风力发电机组的有限元分析及动力特性研究[J]. 特种结构,2012,29(5):31-34.  
ZHU Lei, YE Zhenxiang. Finite element analysis and dynamic characteristic study of wind turbine[J]. Special Structures, 2012, 29(5):31-34. (In Chinese)
- [11] SADOWSKI A J, CAMARA A, MALAGA-CHUQUITAYPE C, et al. Seismic analysis of a tall metal wind turbine support tower with realistic geometric imperfections[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(2):201-219.
- [12] 何玉林,王磊,杜静,等. 地震作用下的风电机组振动仿真分析[J]. 太阳能学报,2012,33(2):179-184.  
HE Yulin, WANG Lei, DU Jing, et al. Vibration simulation analysis of wind turbine under seismic load[J]. Acta Energetica Sinica, 2012, 33(2):179-184. (In Chinese)
- [13] ASAREH M A, SCHONBERG W, VOLZ J. Effects of seismic and aerodynamic load interaction on structural dynamic response of multi-megawatt utility scale horizontal axis wind turbines[J]. Renewable Energy: An International Journal, 2016, 86:49-58.
- [14] 宋波,曾洁. 风电塔非线性地震动力响应规律与极限值评价[J]. 北京科技大学学报,2013,35(10):1382-1389.  
SONG Bo, ZENG Jie. Nonlinear seismic dynamic response and critical value evaluation based on limit states of wind turbine tower structures[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(10):1382-1389. (In Chinese)
- [15] 袁宏伟,杨杰,崔巍,等. 不同竖向地震载荷下52M镍基合金DMWJ断裂行为数值模拟[J]. 机械强度,2022,44(6):1469-1475.  
YUAN Hongwei, YANG Jie, CUI Wei, et al. Numerical simulation of fracture behavior for 52M nickel base alloy DMWJ under different vertical earthquake loads[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(6):1469-1475. (In Chinese)
- [16] 陈俊岭,李哲旭,舒文雅,等. 不同应变率下Q345钢材力学性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2015,45(6):1145-1150.  
CHEN Junling, LI Zhexu, SHU Wenya, et al. Experimental study on dynamic mechanical behavior of Q345 steel under different strain rates[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(6):1145-1150. (In Chinese)
- [17] 刘芳平,潘冬冬,刘灵,等. 地震作用下风机塔筒结构动力响应分析[J]. 现代制造技术与装备,2018(8):34-35.  
LIU Fangping, PAN Dongdong, LIU Ling, et al. Dynamic response analysis of fan tower structure under earthquake action[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018(8):34-35. (In Chinese)
- [18] IOANNIS P, MARIA M. The environmental seismic intensity scale(ESI 2007) in Greece, addition of new events and its relationship with magnitude in Greece and the mediterranean; preliminary attenuation relationships[J]. Quaternary International, 2017, 451:37-55.
- [19] NGUYEN D D, THUSA B, HAN T, et al. Identifying significant earthquake intensity measures for evaluating seismic damage and fragility of nuclear power plant structures[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52:192-205.
- [20] 李伟. 地震烈度表宏观震害和地震动参数研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2012:17-19.  
LI Wei. Research on macro seismic damages and ground motion parameters for seismic intensity scale[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012:17-19. (In Chinese)
- [21] 杨璐,陈虹,岳永志,等. 反应谱法与时程分析法抗震分析对比[J]. 沈阳工业大学学报,2016,38(3):331-336.  
YANG Lu, CHEN Hong, YUE Yongzhi, et al. Contrast in seismic analysis with response spectrum and time history analysis methods[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2016, 38(3):331-336. (In Chinese)
- [22] 周利剑. 水平地震激励下立式储罐与地基相互作用动力响应分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006:54-68.  
ZHOU Lijian. Earthquake response analysis of liquid storage tanks under lateral excitations with soil-structure interaction[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006:54-68. (In Chinese)
- [23] YANG J, WANG G Z, XUAN F Z, et al. Unified characterisation of in-plane and out-of-plane constraint based on crack-tip equivalent plastic strain[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Material & Structures, 2013, 36(6):504-514.
- [24] YANG J, WANG G Z, XUAN F Z, et al. Unified correlation of in-plane and out-of-plane constraints with fracture toughness[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2014, 37(2):132-145.
- [25] 杨杰,王雷. 实际结构拘束相关断裂韧性的确定方法研究[J]. 机械强度,2017,39(6):1438-1444.  
YANG Jie, WANG Lei. Study on the determination method of constraint dependent fracture toughness of structure[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(6):1438-1444. (In Chinese)

## Influence and comparison of vertical and horizontal earthquake loads on the crack tip strain field of a 1.5 MW wind turbine tower

YANG Jie<sup>1</sup> YUAN Hongwei<sup>1,2</sup> GUO Guoliang<sup>3</sup> CUI Wei<sup>1</sup> CHEN Haofeng<sup>4</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(2. Anhui Ronds Science & Technology Incorporated Company, Hefei 230088, China)

(3. Yanfeng Automotive Intelligent Safety System Co., Ltd., Shanghai 201315, China)

(4. Key Laboratory of Pressure Systems and Safety, Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** Taking a 1.5 MW wind turbine tower with different initial crack lengths as the research object, vertical and horizontal earthquake loads with four earthquake intensities and three actual earthquakes were applied, respectively. The influence of vertical and horizontal earthquake loads on the strain field at the crack tip of the wind turbine tower was studied and compared. The results indicate that both under vertical and horizontal earthquake loads, the equivalent plastic strain area at the crack tip increases with the increase of earthquake intensity, but under horizontal earthquake loads, the equivalent plastic strain area at the crack tip increases more rapidly. Under earthquake intensities of VI and VII, the impact of vertical earthquake loads is greater than that of horizontal earthquake loads. As the earthquake intensity increases, the impact of horizontal earthquake loads increases sharply under earthquake intensities of VIII and IX, and far exceeding the impact of vertical earthquake loads. The impact of vertical actual earthquake load on the crack tip equivalent plastic strain area is related to the magnitude and earthquake acceleration time-history curve, while the impact of horizontal actual earthquake load on the crack tip equivalent plastic strain area is related to the earthquake acceleration time-history curve.

**Key words:** Vertical earthquake load; Horizontal earthquake load; Earthquake intensity; Actual earthquake; Crack tip strain field; Wind turbine tower

Corresponding author: YANG Jie, E-mail: yangjie@usst.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China(51975378, 52375154, 52311530067, 52150710540)

Received: 2023-07-14 Revised: 2023-09-25