

张家志,胡益民,吕伟荣,等.风机基础局部加固设计与计算[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(4):38-41. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.006

Zhang J Z, Hu Y M, Lyu W R, et al. Design and Calculation of Local Reinforcement of Fan Foundation[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020,35(4):38-41. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.006

风机基础局部加固设计与计算

张家志^{1,2},胡益民¹,吕伟荣^{2*},卢倍嵘²,何潇锐²,付秋云¹,朱峰¹

(1.湘电风能有限公司,湖南湘潭411102;2.湖南科技大学土木工程学院,湖南湘潭411201)

摘要: 鉴于目前风机基础中存在的混凝土风致疲劳破坏,本文提出一种局部栓钉加固方案,即通过对原破损混凝土及穿筒钢筋进行置换后,在穿筒钢筋上下一定范围内,在基础环内外均布置一定数量的栓钉以加强混凝土与基础环间的连接强度.对标准加固单元的极限荷载工况、正常运行工况和疲劳强度进行承载力以及疲劳强度验算.该加固方案目前已应用于实际工程中,并取得了良好的效果,可供实际工程参考.

关键词: 风机基础;加固设计;疲劳计算

中图分类号: TU359 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2020)04-0038-04

Design and Calculation of Local Reinforcement of Fan Foundation

Zhang Jiazhi^{1,2}, Hu Yimin¹, Lyu Weirong², Lu Beirong², He Xiaokun², Fu Qiuyun¹, Zhu Feng¹

(1.Xiangtan Energy Manufacturing Creative Windpower Co., Ltd., Xiangtan 411102, China;

2.School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In view of wind-induced fatigue leading to concrete damage in wind turbine foundation at present, a scheme was presented for the portion reinforcement of studs, in which the original damaged concrete and transverse reinforcement were replaced, in the upper and lower range of transverse reinforcement, connection strength between concrete and base-ring was strengthened by arranging a certain amount of studs at internal and external base-ring. Bearing capacity and fatigue strength checking computations were done by taking the extreme load conditions capacity, the normal operating load conditions capacity and the fatigue strength. This reinforcement scheme has been applied to practical engineering program and it has achieved good results and can be a practical engineering reference.

Keywords: wind turbine foundation; reinforcement design; fatigue calculation

风机作为一种特殊的高耸结构,设计基准期内需长期承受变化的风荷载,为此可靠的风机基础设计是确保风机运行良好稳定的前提.近年来,我国风力发电机组陆续出现因基础周边混凝土的严重疲劳损伤,导致混凝土对风机塔筒嵌固不牢而摇摆严重,上部机组无法继续运行的情况,风能企业因此造成了巨大的经济损失.

针对上述问题,国内外对风机基础的锚固机理以及基础钢环与混凝土的连接和加固进行了广泛的研究.孔德伟^[1]指出,当钢筒埋置深度达到一定值时,锚固板对钢板沿埋置深度的应变变化规律影响不大,建

收稿日期:2017-03-23 修改日期:2020-10-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578235;51678234)

*通信作者,E-mail: lwxm@126.com

议不考虑端部的锚固作用而将锚固板作为安全储备;周新刚^[2]认为,为防止风机基础发生疲劳破坏,应增加筒环埋置深度,同时在筒环两侧的素混凝土区域增加构造钢筋;马人乐^[3-4]设计了一种反向平衡法兰用于各段塔筒连接,具有相当的强度储备和抗疲劳荷载作用,是监测风电结构的振动频率并及时发现结构亚健康状态的必要手段;康明虎^[5-6]指出,钢筒与混凝土粘结力失效将从下法兰附近发生,增加环梁的加固方案可提高混凝土基础上表面的局部强度,但对混凝土基础局部应力的降低十分有限,同时提出了采用注浆方式对风机基础进行加固的方法;陈春华^[7]则提出使用化学灌浆法对问题风机基础进行加固的方法;吕伟荣^[8]基于大量现场实测和调查结果,提出了基础环式风机基础疲劳损伤机理,为国内目前此类风机基础改进设计和加固提供了方向。

以上研究成果均未能就目前风机基础出现的疲劳损伤提出切实有效的加固方案.为此,本文针对风机基础风致疲劳损伤提出了一种局部栓钉加固设计方案,即将严重破损的风机基础混凝土破拆后,在上穿筒钢筋附近高度区域的基础环内外两侧布置直径为 22 mm,长度为 200 mm 的栓钉,同时,将原断裂或未断裂的穿筒钢筋用直径为 25 mm 的 PSB830 精轧螺纹钢替代(该钢筋不仅强度高,而且抗疲劳性能好),最后用抗裂性好的聚丙烯纤维混凝土予以覆盖,如图 1~图 3 所示。

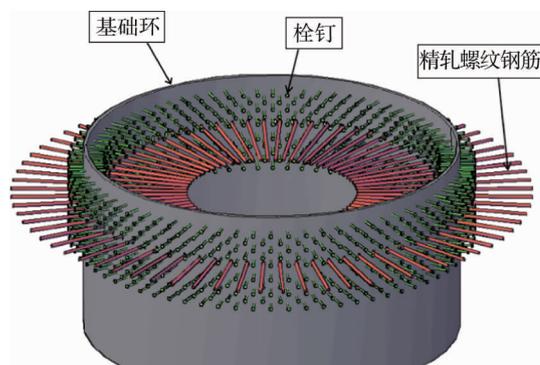


图1 拟加固方案

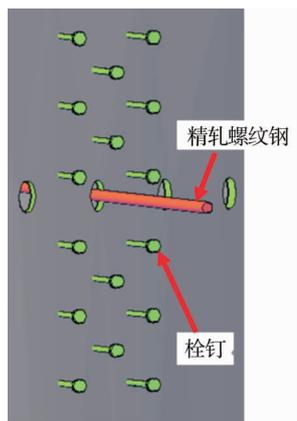


图2 拟加固方案加固单元

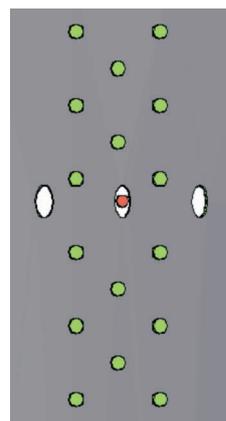


图3 拟加固方案中基础环栓钉分布

1 加固设计参数

1.1 设计荷载取值

根据相关设计方案要求,基础结构安全等级为一级,基础设计级别为一级,使用年限为 50 年.风机基础顶部荷载需要满足极端荷载工况和正常运行荷载工况下的最不利组合极限值,且安全系数为 1.5~1.8.安全系数为 1.35 时,极端荷载工况下的最不利组合极限值:弯矩 $M=60\ 708\ \text{kN}\cdot\text{m}$,水平力 $H=847.6\ \text{kN}$,竖向力 $N=3\ 335.3\ \text{kN}$;安全系数为 1.0 时,正常运行荷载工况下的最不利组合极限值:弯矩 $M=29\ 888\ \text{kN}\cdot\text{m}$,水平力 $H=428.6\ \text{kN}$,竖向力 $N=2\ 509.3\ \text{kN}$.

根据在加固设计时安全系数为 1.5~1.8 的要求,设计中在极端荷载工况取安全系数为 1.65,正常运行荷载取安全系数为 1.8.经计算得到设计用极端荷载工况安全系数为 1.65 时,极端荷载工况下的最不利组合极限值:弯矩 $M=74\ 199\ \text{kN}\cdot\text{m}$,水平力 $H=1\ 036\ \text{kN}$,竖向力 $N=4\ 076\ \text{kN}$;正常运行荷载工况根据加固设计安全系数取 1.5~1.8 的要求,设计中,经计算得到设计用正常运行荷载工况安全系数为 1.8 时,正常运行荷载工况下的最不利组合极限值:弯矩 $M=53\ 798\ \text{kN}\cdot\text{m}$,水平力 $H=771\ \text{kN}$,竖向力 $N=4\ 517\ \text{kN}$.疲劳强度验算工况根据加固设计安全系数取 1.5~1.8 的要求,设计中对正常运行荷载时安全系数为 1.5,参考国内某知名主机厂家的《XE105D-2000 风力发电机组基础荷载计算报告》,取等效疲劳荷载幅值 $L_N=$

13 109.3 kN·m, 疲劳载荷平均值 $L_{\text{mean}} = 6\ 850.75\ \text{kN}\cdot\text{m}$, 经计算得到设计用正常运行荷载工况安全系数取 1.5 时, 正常运行荷载工况下的最不利组合极限值中等效疲劳荷载上、下限公式分别为 $L_{\text{max}} = L_{\text{mean}} + 0.5 L_N$, $L_{\text{min}} = L_{\text{mean}} - 0.5 L_N$, 代入主机厂家提供的相关参数可得计算风机基础等效疲劳荷载上限 $L_{\text{max}} = 19\ 529\ \text{kN}\cdot\text{m}$, 下限 $L_{\text{min}} = 10\ 276\ \text{kN}\cdot\text{m}$;

1.2 材料设计取值

钢板材料为 Q345E, 设计强度 $f = 310\ \text{N}/\text{mm}^2$; 穿筒钢筋所在的椭圆孔, 长轴直径 80 mm, 短轴直径 39 mm. 风机基础环直径 $D = 4\ 300\ \text{mm}$ (外径), 钢环厚度为 32 mm, 面积 $A = 4.29 \times 10^5\ \text{mm}^2$; 截面抵抗矩 $W = 4.57 \times 10^8\ \text{mm}^3$, 基础穿筒的个数为 72 个.

1.3 标准加固单元受力计算

拟加固方案的开孔布置如图 4 所示, 标准加固单元宽度为 376 mm. 根据《风电场机组地基基础设计规定(试行)》(FD 003—2007)^[9] 7.3.1 和 7.3.2 条的规定, 本设计基础结构安全等级为一级, 结构重要性系数取 1.1. 对于基本组合, 荷载效应对结构不利时, 永久荷载分项系数为 1.2, 可变荷载分项系数不小于 1.5. 荷载工况中, 弯矩 M 和水平力 H 为可变荷载, 竖向力 N 为永久荷载.

为此, 风机钢筒底部加固单元最不利应力计算公式如式(1)所示.

$$\sigma_{\text{max}} = 1.1 \left(1.2 \frac{N}{A} + 1.5 \frac{M + Hh}{W} \right). \quad (1)$$

式中: σ_{max} 为钢筒边缘最大受弯应力; A 为底部钢筒截面面积; W 为底部钢筒截面抵抗矩.

如图 4 所示, 式(1)中的 h 为加固单元穿筒孔洞中心距修复后地面的高度, 取 600 mm. 相对应可求得钢板标准加固单元在极端荷载工况、正常运行工况和疲劳强度工况下受到的正应力 σ_{max} , 如表 1 所示. 加固计算单元栓钉实际所受剪力 V 为上述钢板受到的轴力 N , 即单元应力式(1)与其面积的乘积. 为此, 近似将式(1)计算得到的最不利应力 σ_{max} 或应力幅 $\Delta\sigma$ 按线性均匀分布于穿筒钢筋单元所在的验算单元上, 则可得穿筒钢筋受力单元所受剪力 V 或剪力幅 ΔV , 如表 1 所示.

表 1 各工况下钢筒最大正应力及相应穿筒钢筋计算单元所受剪力值

	应力 σ_{max} 或应力幅 $\Delta\sigma / (\text{N}/\text{mm}^2)$	剪力 V 或剪力幅 $\Delta V / \text{kN}$
极限荷载工况	283.00	3 392.00
正常运行工况	210.00	2 518.00
疲劳强度工况	31.55	378.65

2 栓钉群承载力验算

如图 4 所示, 风机基础破拆后, 在上侧穿筒钢筋附近高度区域的基础环内外两侧布置 $\Phi 22$ 的栓钉, 栓钉材料性能等级 4.6, 计算加固单元如图 4 所示, 拟单侧设 20 个栓钉, 两侧共计 40 个栓钉, 各工况下承载力验算如下.

2.1 单栓承载力计算

单栓面积 A_s 为 $380.0\ \text{mm}^2$; 加固混凝土按 C35 混凝土设计, 其中混凝土弹性模量 $E_c = 3.15 \times 10^4\ \text{N}/\text{mm}^2$; 混凝土抗压强度设计值 $f_c = 16.7\ \text{N}/\text{mm}^2$; 栓钉材料性能等级 4.6, 强曲比 $\gamma = 1.67$, 抗拉强度设计值 $f = 215\ \text{N}/\text{mm}^2$. 根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[10] 11.3.1 可知, 一个圆柱头焊钉连接件的抗剪承载力设计值可按式(2)计算.

$$N_v^c = 0.43 A_s \sqrt{E_c f_c} \leq 0.7 A_s \gamma f. \quad (2)$$

由于混凝土强度等级为 C35, 高于 C20, 单栓抗剪承载力取 $0.7 A_s \gamma f = 95.5\ \text{kN}$.

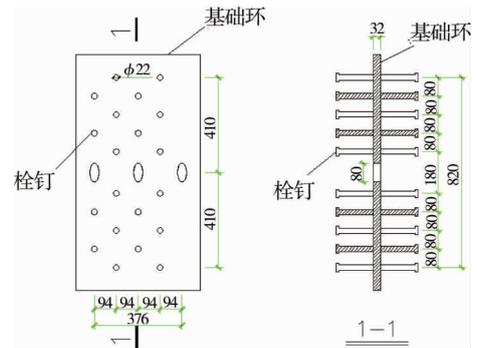


图 4 拟加固方案开孔布置

2.2 螺栓群承载力验算

考虑加固单元钢板两侧共计40个栓钉群承载力为 $N_u = 3\ 820\ \text{kN}$ 。此外,在标准加固单元中考虑3根穿筒钢筋,已知PSB830强度级别的精轧螺纹钢的屈服强度为930 MPa。根据材料力学中的第四强度理论,即受纯剪切时,抗剪强度约为抗拉屈服强度的0.58倍,即允许剪应力幅 $[\tau] = 539.4\ \text{MPa}$ 。3根直径为25 mm的穿筒钢筋的抗剪承载力为 $N_3 = 794.33\ \text{kN}$,总承载力为 $N = N_u + N_3 = 4\ 614\ \text{kN}$,满足极端荷载工况和正常运行工况的要求。

2.3 栓钉群疲劳强度验算

根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[10]可知,圆柱头焊钉连接件的剪应力幅的疲劳截止限值为 $[\Delta\tau_L]_{1 \times 10^8} = 55\ \text{N/mm}^2$ 。已知单栓钉在疲劳强度工况下所需承受的剪力 V 即为钢筒计算钢板轴向力 $N = 378.65/40 = 9.47\ \text{kN}$ 。单个螺栓所受抗剪应力幅 $\Delta\tau = \frac{N}{0.7A_s} = 35.59\ \text{N/mm}^2 < [\Delta\tau_L]_{1 \times 10^8} = 55\ \text{N/mm}^2$,满足要求。故风机基础采用此加固设计方案是合理的,能够有效地抵抗风机运行过程中风机基础环受到的剪力和弯矩,提高基础环与混凝土的结合强度,增大抗疲劳性能,具有很好的加固效果。

3 工程应用

该风机基础加固设计方法已应用到了湖南某风电场的风机基础环,加固施工过程易行,现场加固效果良好,加固整体外观和加固局部外观如图5和图6所示。



图5 加固整体外观



图6 加固局部外观

4 结论

1) 本文针对风电机组基础环部分提出了一种局部栓钉加固方案,即通过将上排原有穿筒钢筋用精轧螺纹钢替换,并在上侧穿筒钢筋附近区域的基础环内外两侧布置栓钉进行加固。

2) 针对标准加固单元的极限荷载工况、正常运行工况以及疲劳强度进行了受力计算并对栓钉加固方案进行了承载力以及疲劳强度验算,计算结果表明该加固方案完全满足现行规范要求。通过实际工程中的应用,该加固方案取得了良好的效果,可供实际工程推广。

参考文献:

- [1] 孔德伟. 风机基础钢环与混凝土锚固机理分析与试验[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2012.
- [2] 周新刚. 风力发电机组钢筋混凝土基础设计问题的探讨[J]. 水利水电技术, 2014, 45(2): 114-118.
- [3] 马人乐, 黄冬平. 风力发电结构技术创新[C]//中国农业机械工业协会风能设备分会 2012 年度论文集(上), 2012.
- [4] 马人乐, 黄冬平. 风电结构亚健康状态研究[J]. 特种结构, 2014, 31(4): 1-4.
- [5] 康明虎, 徐慧, 黄鑫. 基础环形式风机基础局部损伤分析[J]. 太阳能学报, 2014, 35(4): 583-588.
- [6] 康明虎. 某风电场风机基础故障分析及处理[J]. 可再生能源, 2014, 32(6): 809-813.
- [7] 陈春华. 风机基础的连接特性分析及加固[J]. 云南电力技术, 2015, 43(s1): 13-16.
- [8] 吕伟荣, 何潇锴, 卢倍嵘等. 插环式风机基础疲劳损伤机理研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 140-148.
- [9] 中国水电工程顾问集团公司风电标准化委员会. 风电场机组地基基础设计规定(试行): FD 003—2007 [S]. 2007.
- [10] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 2017.