

基于热点应力的塔筒门洞焊缝疲劳分析

曾庆忠 郑北超 赵 伟

摘 要 风力发电机塔筒门洞焊缝的疲劳分析,应用最广的方法是热点应力表面外推法。以热点最大主应力作为疲劳分析参数,依据焊缝类型确定热点应力 S-N 曲线,综合考虑厚度缩减系数和材料安全系数来修正 S-N 曲线,然后应用 GH Blad-ed 的疲劳分析模块,计算得到热点处的累积疲劳损伤。

关键词 风力发电机 热点应力 表面外推 门洞焊缝 影响系数矩阵

1 引 言

风力发电机组工作环境比较恶劣,塔筒作为风机最关键的支撑部件,要承受复杂的交变载荷。通常,风机塔筒由多段卷制钢板焊接而成,而门框与塔筒壳也采用焊接结构,因而焊缝的疲劳分析是塔筒设计中相当重要的环节。

钢结构焊接疲劳分析方法主要有名义应力法和结构应力法。名义应力是根据线弹性力学的基本理论得到的应力,不包括由缺口效应引起的应力分量;结构应力可完全反映结构的应力水平,包括名义应力和局部效应的影响,但不包括焊缝自身的缺口效应影响。结构应力又称为热点应力,通常要求用数值计算方法来确定。

如果名义应力用于焊缝疲劳分析,则平行或者垂直于焊缝的应力起决定作用。若正应力和切应力同时发生,需要考虑它们的组合效应^[1]。如果热点应力用于焊缝疲劳分析,则主应力起决定作用^[1]。塔筒卷制钢板之间的环向焊缝疲劳分析一般用名义应力法,而门框与筒壳的焊缝形状并不规则,用名义应力法很困难,因而采用热点应力法。本文主要讨论门洞焊缝的疲劳分析。

2 热点应力

焊接结构中,焊趾是最易发生疲劳破坏的部位,热点一般选在焊趾处。图 1 所示为焊趾缺口处

正应力沿板厚的非线性分布,缺口应力 σ_{in} 可分解为 3 部分:膜应力 σ_{mem} 、壳弯曲应力 σ_{ben} 以及非线性峰值应力 σ_{nlp} 。热点应力不包括焊趾自身引起的缺口效应影响,比如焊趾处的非线性峰值应力^[1],因此可将热点应力定义为膜应力和壳弯曲应力之和,而焊趾缺口效应在热点应力 S-N 曲线中考虑。

计算热点应力最常用的方法是表面应力外推

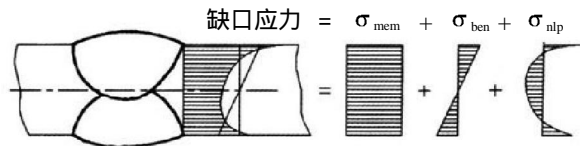


图 1 缺口处非线性应力分布

法,利用距离焊趾一定距离的 2 个或 3 个参考点的表面结构应力,进行线性或二次插值来确定焊趾热点应力。参考点的选择应满足以下要求:必须位于焊趾缺口效应影响区之外;必须距离焊趾足够近,以确保捕捉到焊趾处局部效应的影响。

图 2 描述了国际焊接学会(IIW)推荐的一种热

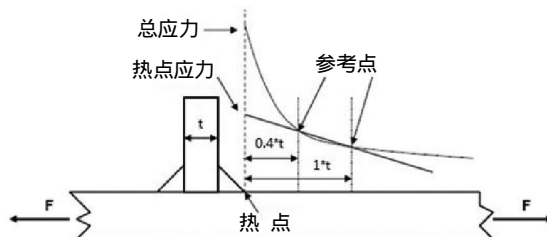


图 2 热点应力两点线性外推

点应力两点线性外推法的原理。首先利用有限元方法得到距离热点 0.4t 和 1.0t 的两个参考点处的

来稿时间 2012—08

结构应力,然后线性外推得到热点应力,其中 t 为焊接板中较薄板的厚度。两点线性插值公式为:

$$\sigma = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t}$$

3 门洞焊缝疲劳分析

3.1 有限元模型的建立

将塔筒三维模型以 Parasolid 格式导入到 ANSYS 软件中,由于对称性,故只需建立一半的塔筒模型。塔筒实体用 Solid186 单元划分网格,在门洞焊接部位进行局部网格细化,以提高分析精度。由于塔筒承受很大的弯矩,为方便加载,在模型顶部中心建立了一个节点(载荷施加点),用 beam4 单元连接此节点与顶面上的节点,形成一个“载荷伞”;“载荷伞”的刚度对门洞附近的应力影响很小。完成网格划分的模型如图 3 所示。

图 4 是门洞焊缝焊趾位置示意图,从图中可看

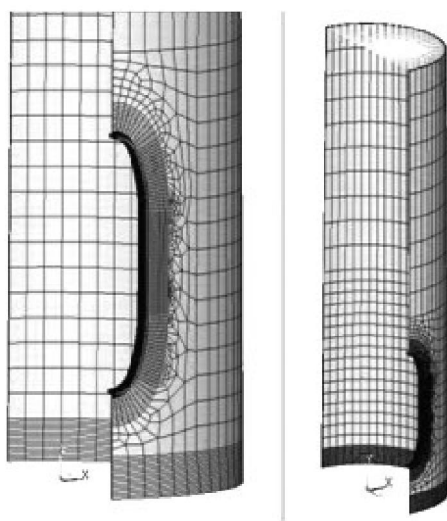


图 3 门洞区域有限元模型

出,焊趾分布在 4 个位置:外侧筒壁、外侧门框、内侧筒壁、内侧门框。

FEA 模型中没有模拟焊缝自身几何结构,尖角处存在应力奇异,后处理时将不考虑应力奇异的单元。假定焊趾位于距离尖角 $0.4t$ 处,依据 IIW 两点线性外推法,两参考点分别位于 $0.8t$ 和 $1.4t$ 处,参考点实际构成了两条“参考线”;“参考线”上节点(中间节点除外)都要考虑。图 5 中所示是外侧焊趾的“参考线”位置,内侧焊趾类似。

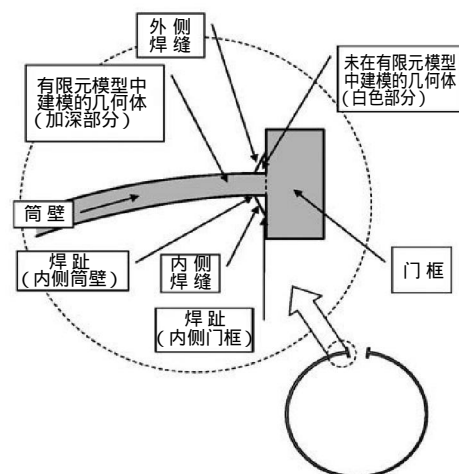


图 4 门洞焊缝截面示意图

约束塔底节点所有自由度,在“载荷伞”中心节点分别施加 M_x 、 M_y 两个单位载荷,作为两个载荷

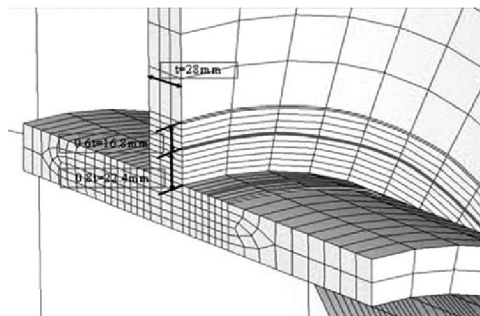


图 5 IIW 应力提取位置有限元模型

步进行求解。由于只建立了一半实体模型,因此施加 $0.5Nm$ 的载荷。

为了考虑 M_x 与 M_y 的组合作用,建立局部坐标系,使其 x 轴与 y 轴分别与平行于焊缝(σ_{xx})和垂直于焊缝(σ_{yy})的方向一致,将表面应力结果分解到这两个方向,然后外推插值到热点位置。“参考线”上某节点的局部坐标系如图 6 所示,随着节点不同,局部坐标系方向也跟着发生变化。

3.2 热点选择及其影响系数矩阵

以节点局部坐标系为结果坐标系,分别提取“参考线”上节点的正应力(σ_{xx} 、 σ_{yy})和切应力(τ_{xy}),通过两点线性外推得到焊趾处的正应力和切应力。由于载荷分量 M_y 比 M_x 小一个数量级,因此以 M_x 引起的主应力最大值确定热点。

将 M_x 作用下焊趾处的正应力和切应力带入图 7 中的主应力计算公式,得到焊趾处的最大主应力和最小主应力,选择焊趾处主应力绝对值最大的节

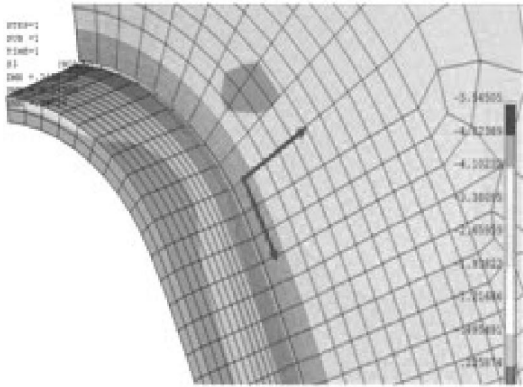


图 6 局部坐标系

点为热点。

图 8 给出了所有焊趾在 M_x 和 M_y 作用下的应

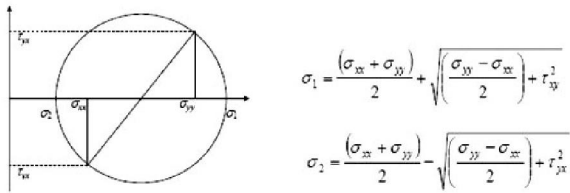


图 7 主应力计算公式

力结果，横坐标是焊趾到塔底的垂直距离。从图中可清晰看出最大主应力所在位置，A、B、C 和 D 四点即为所选的热点。表 1 列出了 4 个热点的坐标、最大主应力及各应力分量的影响系数矩阵。影响系数矩阵一个 $m \times n$ 阶矩阵， m 表示热点个数， n 表示载荷分量个数，即为 4×2 阶矩阵。

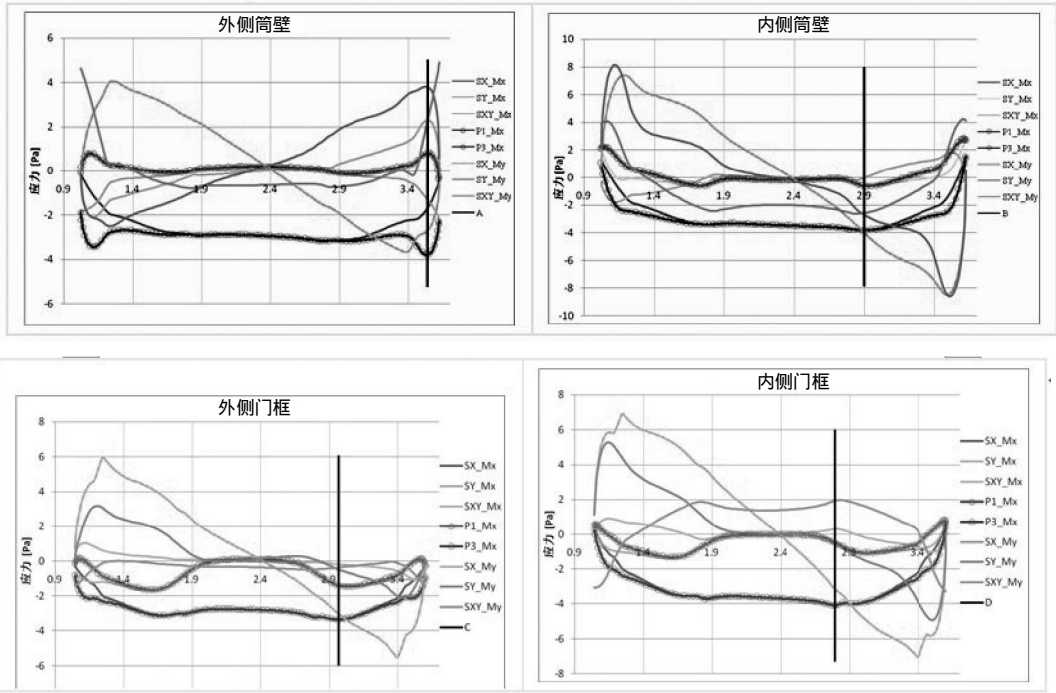


图 8 M_x 和 M_y 作用下的应力结果

表 1 热点影响系数矩阵

焊缝位置	热点	节点 (no)	X 坐标 (m)	Y 坐标 (m)	$PS_{max_M_x}$ (Pa)	$S_{x_M_x}$ (Pa)	$S_{x_M_y}$ (Pa)	$S_{y_M_x}$ (Pa)	$S_{y_M_y}$ (Pa)	$S_{xy_M_x}$ (Pa)	$S_{xy_M_y}$ (Pa)
外侧筒壁	A	47071	0.22	3.53	- 3.79	- 1.80	- 2.77	- 1.19	3.81	2.27	1.89
内侧筒壁	B	47052	0.40	2.91	- 3.81	- 3.81	- 4.21	- 0.63	- 2.83	0.06	- 2.55
外侧门框	C	47180	0.37	2.98	- 3.35	- 3.33	- 3.09	- 1.43	- 0.51	- 0.20	- 0.37
内侧门框	D	28360	0.38	2.80	- 4.11	- 4.08	- 3.17	- 0.53	- 0.59	0.30	1.93

3.3 焊缝疲劳分析

影响系数矩阵描述的是载荷与应力的线性关系,载荷时间历程是载荷随时间的曲线,将载荷时间历程与影响系数矩阵做一个通道组合,即得到应力时间历程。通过 3 个分量的应力时间历程,计算出最大主应力的时间历程 MAPS。

S-N 曲线是疲劳损伤计算很关键的因素,热点的

S-N 曲线是通过疲劳等级(DC,即 Detail category)来确定的。门洞焊缝的 DC 确定为 100^[1],同时考虑厚度缩减系数 TRF 以及材料安全系数来修正 S-N 曲线。

利用 GH Bladed 软件里的 Fatigue Analysis 模块,设置 S-N 曲线,对 MAPS 进行雨流计数,可得到热点的累积疲劳损伤值,如表 2 所示,损伤小于 0.5^[2],满足设计要求。

表 2 疲劳损伤计算结果

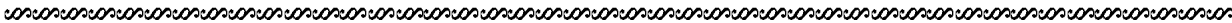
焊缝位置	热 点	疲劳等级 (DC)	厚 度 (mm)	缩减系数	安全系数(γ^m)	损 伤
外侧筒壁	A	100	28	0.978	1.265	0.201
内侧筒壁	B	100	28	0.978	1.265	0.252
外侧门框	C	100	30	0.964	1.265	0.129
内侧门框	D	100	30	0.964	1.265	0.356

参考文献

4 结 语

本文描述了热点应力的提取方法及影响系数矩阵的应用,探讨了门洞焊缝的疲劳分析方法。热点应力法主要是针对焊趾的疲劳强度分析,而对于焊根以及其他内部焊接缺陷尚有一定的局限性。

- 1 IIW document XIII - 2151 - 07/XV - 1254 - 07, RECOMMENDATIONS FOR FATIGUE DESIGN OF WELDED JOINTS AND COMPONENTS
- 2 Guideline for the Certification of Wind Turbines, 2010



· 信息 ·

我公司中标仙居抽水蓄能电站发电电动机
及其附属设备项目

浙江仙居电站装机 4 台目前国内单机容量最大的 375MW 抽水蓄能机组,在国内抽水蓄能电站发展史上具有里程碑地位,是我公司的重要目标项目。

通过积极努力,我公司中标仙居抽水蓄能电站 4 × 375MW 发电电动机及其附属设备项目。2012 年 6 月 20 日,该项目的合同签字仪式在杭州举行,计划 2016 年投入商业运行。总经理贺建华在签字仪式上承诺:“公司将全面履行招标文件和合同文件所规定的责任和义务,以最先进的技术、优秀的管理和全面周到的服务,为把仙居抽水蓄能电站建设成为世界一流抽水蓄能电站提供强有力的技术支持和设备保证。”