

考虑焊接残余应力的桅杆结构拉耳节点 风致疲劳裂纹萌生寿命评定

王文利^{1,2} 瞿伟廉¹ 皮永林³

(1. 武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北武汉 430070;
2. 湖北工业大学, 湖北武汉 430068; 3. 科技大学, 澳大利亚悉尼)

摘要: 提出对评定桅杆结构拉耳节点焊缝处的裂纹萌生累积疲劳损伤程度的方法。在建立桅杆结构拉耳节点风致应力场的多尺度分析方法的基础上, 考虑拉耳节点的焊接残余应力, 用基于临界面法的应变疲劳分析方法进行在焊接残余应力和纤维外荷载双重作用下的累积疲劳损伤量的计算, 然后依据 Mason-coffin 公式及 Miner 疲劳累积损伤准则估算桅杆结构纤维连接拉耳各不同风向不同平均风速作用下的多轴疲劳累积损伤, 由总损伤计算出裂纹萌生寿命。

关键词: 桅杆结构拉耳; 焊接残余应力; 裂纹萌生; 疲劳寿命

中图分类号: TU347 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-131X(2010)增-0022-06

Assessment of wind-induced fatigue crack initiation life at guyed mast earplate joints considering welding residual stresses

Wang Wenli^{1,2} Qu Weilian¹ Pi Yonglin³

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei University of Industry

Wuhan 430068, China; 3. University of Technology, Sydney, Australia)

Abstract A new method for assessing the degree of the cumulative fatigue crack initiation damage of the welds of earplate joints of a guyed mast, which connect the mast with the cable, is proposed. Based on the multi-scale wind-induced stress analysis of the earplate joint and considering the welding residual stresses at the earplate joints, the critical plane approach is used for the calculation of the cumulative strain fatigue damage due to combined actions of the welding residual stresses and wind load. The multi-axis fatigue accumulative damages of the welds of earplate joints in different wind orientations and at different wind average velocities are then evaluated on basis of Mason-coffin formula and Miner fatigue accumulative damage rule. The crack gemination life is also calculated from the total damage.

Keywords guyed mast earplate joint; welding residual stress; crack initiation; fatigue life assessment

E-mail unique_ww@126.com

引 言

桅杆结构是一种广泛应用于通讯工程的高耸结构。由于它具有高和柔的特点, 因此对风荷载的作用比较敏感, 历史上曾多次发生桅杆结构风致倒塌破坏的案例。而在这些事故中, 主桅杆与纤维联结的拉耳

节点发生疲劳破坏是主要原因之一。因此, 研究桅杆结构拉耳节点的风致裂纹萌生累积疲劳寿命的评定方法是十分有意义的。

对于桅杆结构, 国内外的研究主要集中在结构的风致响应^[1-5]上。对于桅杆结构拉耳节点的风致疲劳分析虽也有少量的研究, 如同济大学的徐志宏应用断裂力学的概念建立了拉耳节点焊缝位置裂纹扩展的计算方法^[6], 但是, 一方面, 他的研究对象是拉耳焊缝位置裂纹扩展的计算方法, 且由于拉耳节点焊缝的疲劳破坏是先发生裂纹萌生, 再出现裂纹扩展, 而裂纹扩展的时间要比裂纹萌生短的多, 因此建立拉耳节点

基金项目: 国家自然科学基金 (50830203, 50678142)

作者简介: 王文利, 博士研究生

收稿日期: 2010-09-21

焊缝位置裂纹萌生累积疲劳寿命的评定方法对于桅杆结构拉耳节点的抗风设计是至关重要的;另一方面,由于土木工程结构焊接构件的焊接残余应力很难完全消除,因此在进行拉耳节点焊缝位置裂纹萌生累积疲劳寿命的评定时,考虑焊接残余应力的影响也是十分必要的。尽管国内外对于焊接残余应力的数值模拟已有一套较为系统的方法^[7-16],但是如何在考虑焊接残余应力影响的基础上来进行焊缝裂纹萌生累积疲劳寿命的评定还是一个全新的课题。

本文在建立了桅杆结构拉耳节点风致应力场的多重尺度分析方法的基础上,将拉耳节点焊缝的焊接残余应力场作为初始应力场,并在此基础上迭加上拉耳节点焊缝处的风致应力。由于一般情况下,此时的焊缝位置部分进入了弹塑性范围,因此它的裂纹萌生将属于应变疲劳的范畴。据此,我们建立了拉耳节点焊缝裂纹萌生累积疲劳寿命评定的损伤临界面法。并通过一个工程实例,完成风力作用下桅杆结构拉耳节点焊缝裂纹萌生累积疲劳寿命评定的全过程。

1 桅杆结构的非线性动力计算

1.1 概况

选取图 1 所示的 152m 高的桅杆结构为计算结构^[10],处于 B 类地貌风场中,纤绳初应力为 $\sigma_0 = 25 \text{ N/mm}^2$ 。

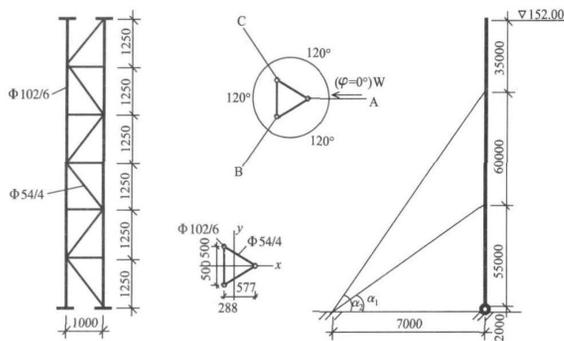


图 1 某 152m 无线电桅杆

Fig 1 Calculation diagram of the guyed mast

1.2 桅杆结构的动力计算模型

用 ANSYS 有限元程序建立桅杆结构的有限元模型。由于纤绳具有强非线性,因此根据纤绳的受力特点,按每根纤绳在预张力下的悬链线,对结构上下层纤绳分别用 30 和 20 个 Link10 单元来连接,主桅杆结构则用空间梁单元来连接。整个模型共 517 个节点,1086 个梁单元,150 个杆单元。图 2 所示为部分桅杆结构非线性有限元模型。

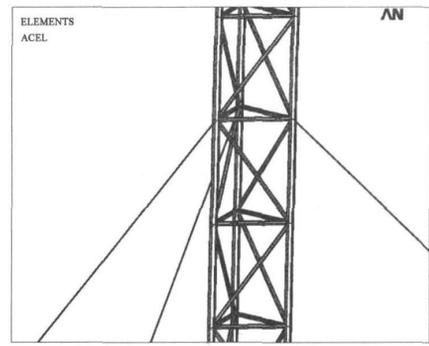


图 2 部分桅杆结构非线性有限元模型

Fig 2 Part of the mast structure finite element model

1.3 风的特性

1.3.1 风荷载的基本特性

风作用通常包括两个部分:稳定风(平均风)和脉动风,作用于结构上任一点 (x, y, z) 的风速 $v(x, y, z)$ 为平均风速 $v(z)$ 和脉动风速 $v_f(x, y, z)$ 之和:

$$v(x, y, z, t) = v(z) + v_f(x, y, z, t) \quad (1)$$

平均风是在给定时间间隔内风力大小及方向不随时间而改变的量,在结构分析时常作为随机变量加以处理,平均风速与测量的高度有关;而脉动风则具有明显的随机性,一般随位置和时间而随机变化。

1.3.2 风速、风向分布

在实际情况下,大风出现的频率相对较小,而微风出现的频率则大得多,因而桅杆发生微风风激振动的频率也就很高,所以在分析结构风振疲劳寿命时需要考虑各种风速出现的频率;另外风速分布是空间的,风的作用来自任意方向,且每个方向上风的强度与出现频率有所不同,因此还需考虑风作用的方向。

严格来说,应该通过风的方向和强度的联合概率密度函数来定义风作用,但到目前为止尚缺乏这方面的统计资料。现阶段的一般做法是采用边缘概率密度来描述风的作用,如表 1 所示为某地区 20 年内各方向不同平均风速的出现概率。

1.4 基于 FFT 改进谐波叠加法的脉动风速模拟

Davenport 谱由于形式简单、代表性较强等特点而受到广泛应用。根据已知功率谱密度,模拟平稳高斯随机过程的方法主要有谐波叠加法、线性滤波器法等。谐波叠加法在模拟多维随机过程时计算工作量大,在谐波叠加法基础上引入 FFT(快速傅里叶变换)改进模拟算法,能大幅提高运算效率,近年来得到广泛应用。于是,本文以 Davenport 阵风谱为依据,应用基于 FFT 改进的谐波叠加法模拟了沿结构高度的 15 条风荷载样本,每条持续时间为 600s。由风模拟程序得到风速时程曲线后,可以将其转化为不同时刻各节点所受风荷载值。

表 1 20年内各方向不同平均风速的风荷载出现概率

Table 1 Probability on different wind orientation and different average wind speed in 20 years

风向	$V \leq 0.5$	$V = 1$	$V = 2$	$V = 3$	$V = 4$	$V = 5$	$V = 6$	$V = 7$	$V = 8$	$V = 9$	$V = 10$	$V = 11$	$V = 12$	$V \geq 13$
0°	0.015	0.105	0.167	0.186	0.171	0.136	0.095	0.060	0.034	0.017	0.008	0.004	0.001	0.001
30°	0.011	0.092	0.162	0.193	0.182	0.145	0.100	0.060	0.031	0.015	0.006	0.002	0.001	0
60°	0.025	0.149	0.212	0.209	0.166	0.112	0.066	0.035	0.016	0.007	0.002	0.001	0	0
90°	0.042	0.179	0.211	0.189	0.144	0.099	0.062	0.036	0.019	0.010	0.005	0.002	0.001	0.001
120°	0.021	0.123	0.181	0.189	0.165	0.126	0.086	0.052	0.030	0.015	0.007	0.003	0.001	0.001
150°	0.022	0.12	0.170	0.179	0.158	0.125	0.090	0.059	0.036	0.020	0.011	0.005	0.003	0.002
180°	0.016	0.095	0.146	0.164	0.157	0.133	0.103	0.073	0.048	0.030	0.017	0.009	0.005	0.004
210°	0.010	0.068	0.116	0.143	0.149	0.137	0.116	0.090	0.065	0.044	0.028	0.016	0.009	0.009
240°	0.010	0.067	0.112	0.137	0.143	0.134	0.115	0.091	0.068	0.048	0.032	0.020	0.011	0.012
270°	0.018	0.106	0.157	0.171	0.159	0.130	0.097	0.067	0.042	0.025	0.014	0.007	0.004	0.003
300°	0.041	0.174	0.207	0.187	0.146	0.101	0.065	0.038	0.021	0.011	0.005	0.002	0.001	0.001
330°	0.033	0.157	0.199	0.189	0.152	0.109	0.071	0.043	0.024	0.012	0.006	0.003	0.001	0.001

图 3所示为上层纤绳与杆身连接高度处 (115m) 平均风速为 12m/s的脉动风速模拟时程曲线。图 4为杆身节点 (0, 0, 115)处的脉动风荷载时程曲线。

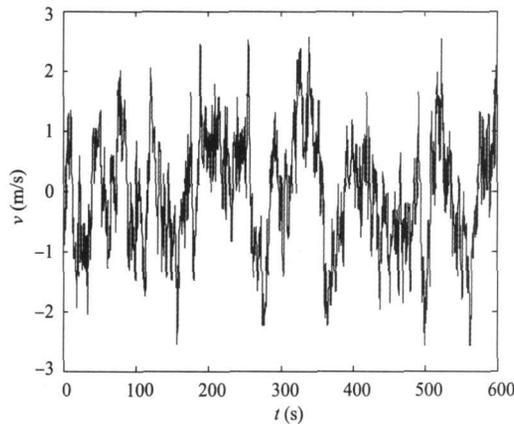


图 3 脉动风速时程曲线

Fig. 3 Fluctuating wind speed time-history curve

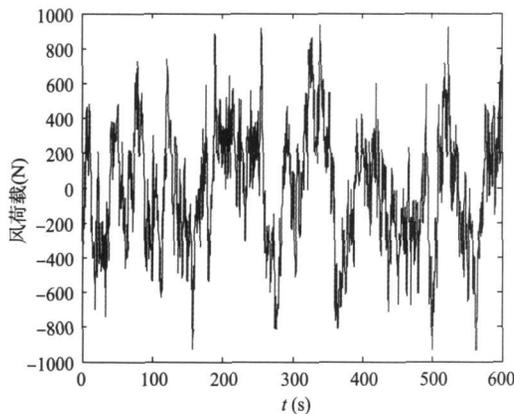


图 4 风荷载时程曲线

Fig. 4 Fluctuating wind load time-history curve

1.5 整体尺度的桅杆结构风致动力响应

根据已建立的桅杆结构非线性动力计算模型,在主桅杆节点层输入模型的风荷载,用时程分析法就可以得到桅杆结构整体尺度的风致响应。图 5所示为 0°风向在风速为 12m/s平均风和模拟脉动风共同作用时上层纤绳的索力时程。

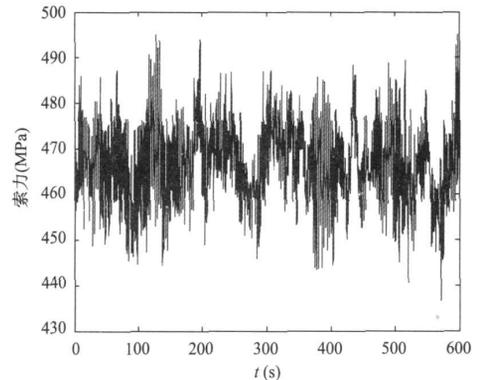


图 5 上层纤绳的索力时程曲线

Fig. 5 Upper cable's stress time-history curve

2 拉耳节点子结构尺度的风致应力场分析

2.1 拉耳节点子结构有限元模型的建立

对于拉耳节点子结构,我们对焊缝和子结构其他部位分别采用了不同的网格划分。在焊缝处采用六面体单元,且网格较密。在焊缝向耳板的过渡区采用四面体单元,且网格划分由密向疏过渡。在远离焊缝的竖杆和耳板位置采用网格较密的六面体单元。当对整个拉耳节点子结构进行焊接温度场计算时,采用 Solid70单元。当对整个拉耳节点子结构进行应力场

计算时采用同样尺寸和网格划分的 Solid45 单元。拉耳节点子结构的尺寸和有限元模型见图 6 和图 7。

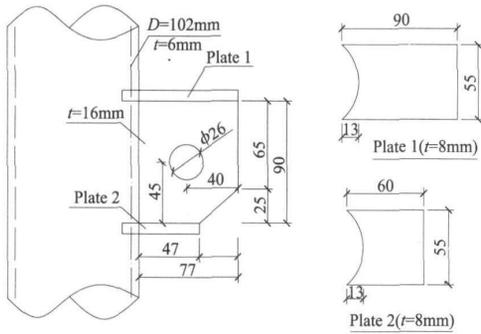


图 6 拉耳局部尺寸图(单位: mm)

Fig 6 Dimensions of earplate (unit mm)

2.2 拉耳节点子结构焊缝焊接残余应力场分析

ANSYS 软件具有计算焊接残余应力的能力, 用 ANSYS 软件进行焊接残余应力场分析的过程如下:

- (1) 进入 ANSYS 前处理器, 将热分析单元转换为结构分析单元;
- (2) 建立材料力学性能随温度变化的参数库, 设定力学分析边界条件及约束条件;
- (3) 用循环的方法读入焊接瞬态温度场各时间点的节点温度;
- (4) 进行焊接过程瞬态应力应变计算;
- (5) 对于冷却后的拉耳节点子结构按消残的工艺, 去除部分焊接残余应力, 并将其作为初始应力场。

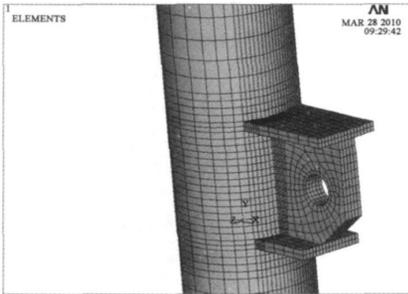


图 7 拉耳局部精细模型

Fig 7 Accurate finite element model of earplate

图 8 为经消残后, 等效残余应力分布云图。从图中可以看出, 焊缝区及附近存在较大的焊接残余应力, 最大残余应力出现在上横板焊缝的焊趾处, 为 32 MPa 达到材料屈服强度的 93%。

2.3 考虑焊接残余应力的拉耳节点子结构风致应力场

桅杆结构拉耳节点风致动应力场的分析流程如下:

- (1) 由 ANSYS 程序读入有限元模型各个节点的消残后的焊接残余应力作为初始应力;
- (2) 以整体有限元模型切割纤维相应节点的风致应力(包括预张力)响应作为外荷载;
- (3) 施加主桅杆切割杆身的位移边界条件;
- (4) 进行桅杆结构拉耳节点焊缝处的风致动应力分析, 得到各个节点在焊接残余应力和风致纤维外荷载双重作用下的应力和应变时程。

按此计算流程, 可得到具有最大 Von-Mise 等效应力的节点 (Node1279), 它的等效应力值超过了钢材的屈服强度 (345MPa)。

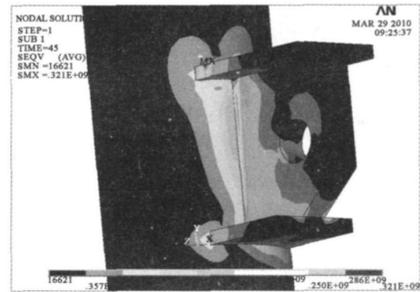


图 8 残余应力 Von-Mises 等效应力云图

Fig 8 Von-Mises equivalent welding residual stress contour

3 拉耳节点子结构裂纹萌生累积疲劳损伤程度的评定

3.1 应变疲劳的损伤临界面法的步骤

由于金属材料的裂纹是因晶体的滑移而引起, 且本文研究的拉耳节点子结构焊缝处的风致应力又超过了屈服强度, 为应变疲劳, 因此决定采用基于最大剪应变平面的临界平面法来分析拉耳节点焊缝最危险点的疲劳损伤。考虑到拉耳节点是处于等比例加载的情况下, 因此在所有时刻, 它的损伤临界面为同一个。这样, 应变疲劳的损伤临界面法的步骤就如同图 9 所示, 其中多轴疲劳寿命估算公式为:

$$\frac{\Delta \epsilon_{eq}^{cr}}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \epsilon'_f (2N)^c \quad (2)$$

破坏准则采用最简单、最著名、使用最广泛的 Miner 线性累积损伤理论, 为:

$$D = \sum_1^k D_i = \sum n_i N_i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

3.2 计算结构的分析结果

经计算确定上层拉耳危险点最大剪应力破坏临界面为: $\theta = 225^\circ, \varphi = 106^\circ$ 。在计算获取了临界损伤面上的剪应变、正应变时程曲线后, 经双重雨流计数分析和等效合成, 可得到上层拉耳的多轴疲劳损伤参量等效应变幅, ϵ_{eq} 图。

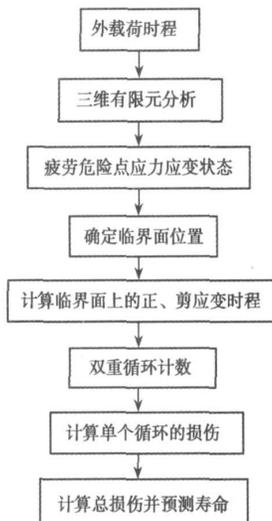


图9 多轴随机载荷的疲劳寿命预测步骤

Fig.9 Calculation flowchart of critical plane approach

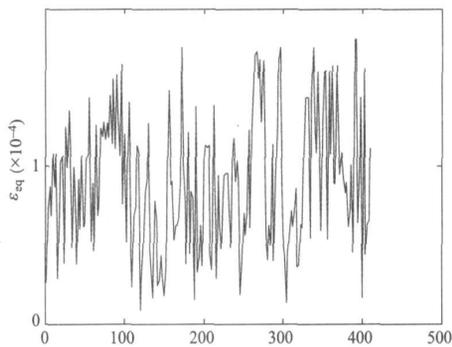


图10 上层临界损伤面的等效应变幅 ϵ_{eq}^{cr}

Fig.10 Upper layer earplate ϵ_{eq}^{cr} of each cycle

桅杆结构纤绳连接拉耳每一个多轴疲劳损伤参量——等效应变 ϵ_{eq} 可根据式 (2) 计算出单个损伤参量对应的循环次数 N , 然后采用 Miner 累积损伤理论——式 (3) 计算累积损伤。风荷载作用下结构的疲劳寿命分析要综合考虑风速、风向的影响, 根据上述风速统计资料, 将风作用平面每 30° 角划为一区域, 共划分为 12 个区域; 平均风速 $1\sim 13\text{m/s}$ 范围内每间隔 $2\sim 3\text{m/s}$ 取为同一等级风速; 采用多轴疲劳临界面法计算各方向不同平均风速下的疲劳累积损伤。计算各不同风向、风速下持续时间为 600s 的累积损伤, 然后根据表 1 各不同风向、风速在 20 年内的出现概率计算出桅杆结构上层纤绳连接拉耳 20 年各风向、向速相应的总累积损伤 (见表 2)。

损伤取决于风速大小和风作用的时间, 20 年内各风向不同平均风速所造成的总累积损伤 $D=0.657$, 则裂纹萌生寿命为:

$$T = \frac{1}{D} \times 20 = \frac{1}{0.657} \times 20 = 30.4 \text{ 年}$$

表 2 20 年内不同风向各平均风速作用下的疲劳累积损伤
Table 2 Accumulated fatigue damage under different wind speed and in different directions in 20 years

平均风速	1m/s	3m/s	6m/s	9m/s	12m/s	13m/s
0°	9.03E-06	6.55E-04	9.84E-02	6.36E-02	1.47E-02	3.39E-03
30°	1.83E-04	8.16E-04	3.65E-02	3.42E-02	8.95E-03	1.41E-02
60°	4.44E-04	3.08E-03	6.79E-03	1.85E-03	6.52E-04	1.13E-04
90°	7.46E-06	6.57E-05	5.18E-03	4.76E-03	1.33E-03	2.98E-04
120°	3.11E-05	3.36E-04	2.17E-03	1.82E-03	1.15E-03	2.31E-04
150°	2.00E-05	2.38E-04	3.19E-02	3.79E-02	1.32E-02	4.12E-03
180°	9.60E-04	3.32E-02	3.36E-02	1.93E-02	2.93E-02	1.37E-02
210°	3.89E-06	2.74E-05	4.33E-05	1.58E-04	2.34E-04	1.67E-04
240°	3.88E-05	5.31E-04	7.42E-03	1.11E-02	1.35E-02	6.87E-03
270°	4.17E-06	2.37E-05	2.58E-05	6.69E-05	7.63E-05	3.92E-05
300°	1.27E-04	6.50E-03	9.17E-03	3.60E-03	2.21E-03	8.34E-04
330°	2.37E-04	6.24E-04	1.88E-02	1.90E-02	6.86E-03	2.13E-03

4 结论

在焊接残余应力和风荷载的双重作用下, 危险节点的 Von-Mises 等效应力可能超过材料的屈服强度, 会产生塑性变形, 于是应该采用低周应变疲劳的方法估算节点的损伤量。

用临界面法进行桅杆结构拉耳节点的疲劳损伤量的估算与其多轴比例加载的条件相吻合。

参 考 文 献

- [1] 何艳丽, 马星, 王肇民, 等. 桅杆结构的风振响应分析及实验研究 [J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(10): 1438-1443 (He Yanli, Ma Xing, Wang Zhaomin. Wind-induced response analysis and wind tunnel test research of guyed mast [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(10): 1438-1443 (in Chinese)).
- [2] Law S S, Bu J Q, Zhu X Q. Time-varying wind load identification from structural responses [J]. Engineering Structures, 2005, 27(10): 1586-1598.
- [3] Meshmeha H, Sennah K, Kennedy J B. Simple method for static and dynamic analyses of guyed towers [J]. Structure Engineering and Mechanics, 2005, 23(3): 635-649.
- [4] Sparling B F, Wegner L D. Estimating peak wind load effects in guyed masts [J]. Wind and Structures, 2007, 10(4): 347-366.
- [5] Gioffre M, Cavaglioli N, Gusella V. Movable guyed masts affected by wind loads: Buckling and stochastic response [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2008, 15(3): 299-314.

- [6] 徐志宏. 桅杆结构焊接节点风致疲劳分析 [D]. 上海: 同济大学, 2005 (Xu Zhong Guyed mast fatigue analysis of welded joints in wind load [D]. Shanghai Tongji University, 2005 (in Chinese))
- [7] 汪建华. 多层焊焊接应力分布对管子局部热处理应力释放准则的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34 (10): 11-14 (Wang Jianhua Effect of residual stress distribution in multi-pass welding on stress relief criterion in local post weld heat treatment of pipe [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34 (10): 11-14 (in Chinese))
- [8] 陈楚等. 数值分析在焊接中的应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985
- [9] 刘川, 张建勋, 牛靖. 数值模拟和实验研究 T6A14V 合金激光熔透焊接残余应力 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 08 (38): 1317-1320 (Liu Chuan, Zhang Jianxun, Niu Jing Numerical and experimental analysis of residual stresses in full-penetration laser beam welding of T6A14V alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38 (8): 1317-1320 (in English))
- [10] Huo Lixing, Chen Furong, Zhang Yufeng, et al. 3D finite element numerical simulation of residual stresses on electron beam welded BT20 plates [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 20 (1): 117-120
- [11] Ranjbar N I, Serajzadeh S, Kokabi A H. Simulation of welding residual stresses in resistance spot welding: FE modeling and X-ray verification [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205 (1/2/3): 60-69
- [12] Anawa E M., O labi A G. Control of welding residual stress for dissimilar laser welded materials [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204 (1/2/3): 22-23
- [13] Deng D, Murakawa H. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements [J]. Computational Materials Science, 2006, 37: 269-277
- [14] Teng T L, Fung C P, Peng H, Yang W C. Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds [J]. Pressure Vessels and Piping, 2001, 78: 523-538
- [15] Chang K H, Lee C H. Residual stresses and fracture mechanics analysis of a crack in welds of high strength steels [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74 (6): 980-994
- [16] 鲁丽君. 桅杆结构纤维绳连接拉耳风致疲劳裂纹萌生与扩展寿命预测 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008 (Lu Lijun Prediction of germination and propagation life of wind induced fatigue crack of earplate connecting guyed-mast to cables [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008 (in Chinese))
- [17] Chen L G. Construction steel welding residual stress and ways to explore [C] // Eleventh National Welding Conference Proceedings, 2005: 35-38
- [18] 陈传堯. 疲劳和断裂 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002
- [19] 尚德广. 多轴疲劳强度 [J]. 北京: 科学出版社, 2007

王文利 (1984-), 女, 博士研究生。主要从事疲劳裂纹研究。

瞿伟廉 (1946-), 男, 硕士, 教授。主要从事结构工程和防灾减灾工程及防护工程研究。

皮永林 (1950-), 男, 博士, 教授。主要从事结构稳定问题研究。