

基于 Zencrack 的岸边集装箱起重机 圆管构件疲劳裂纹扩展分析

张卫国, 宓为建, 刘海洋

(上海海事大学 物流工程学院, 上海 200135)

摘要: 由于二维裂纹扩展模式不能非常全面地反映岸边集装箱起重机结构件的疲劳裂纹扩展行为, 以岸边集装箱起重机圆管构件为研究对象, 利用 Zencrack 三维裂纹分析软件, 详细分析未穿透裂纹与穿透裂纹的裂纹扩展关系, 以及初始裂纹大小和载荷幅值对未穿透裂纹的疲劳裂纹扩展寿命的影响. 对岸边集装箱起重机结构的抗疲劳设计及裂纹管理具有一定的参考价值.

关键词: 岸边集装箱起重机; 圆管构件; 穿透裂纹; 未穿透裂纹; 疲劳裂纹扩展; Zencrack

中图分类号: U653.921; O346.2; TB115 **文献标志码:** A

Analysis on fatigue crack propagation of pipe components of container cranes based on Zencrack

ZHANG Weiguo, MI Weijian, LIU Haiyang

(College of Logistics Eng., Shanghai Maritime Univ., Shanghai 200135, China)

Abstract: Due to the fact that the analysis of 2D modes can not well reflect the fatigue crack propagation behaviors of container crane, the pipe components of container cranes are studied by 3D crack analysis software Zencrack. The relationship between through crack and partly through crack, and the influence of the initial crack size and load amplitude of the components on life-span of partly through crack are analyzed in detail. It can provide references for counteracting fatigue design and crack propagation management of container cranes' structure.

Key words: container crane; pipe component; through crack; partly through crack; fatigue crack propagation; Zencrack

0 引 言

岸边集装箱起重机^[1]作为港口生产的主要装备,属于大型港口机械范畴,其结构件的疲劳问题是港口设备向大型、高速、重载化方向发展所面临的重大的问题之一. 港口企业主要使用岸边集装箱起重机对货物尤其是集装箱进行装卸作业,疲劳破坏成为

其最主要的破坏形式之一,严重影响港口企业的生产和安全. 因此,深入研究岸边集装箱起重机结构件疲劳问题对港口企业的生产及安全意义深远.

圆管构件是岸边集装箱起重机结构件的主要形式之一. 对大型港口结构事故的大量调研及理论分析计算结果表明,圆管构件疲劳破坏的机理是由于设备处于高负荷工作状态,结构件在交变载荷的作

收稿日期: 2007-09-08 修回日期: 2007-12-15

作者简介: 张卫国(1981—),男,黑龙江庆安人,硕士,研究方向为大型港口机械金属结构及疲劳寿命分析, (E-mail) vicochang@163.com;

宓为建(1956—),男,浙江海宁人,教授,博导,博士,研究方向为港口机械电子工程, (E-mail) miweij@shmtu.edu.cn

用下发生疲劳损伤,产生疲劳裂纹.在疲劳损伤的累积作用下,裂纹不断扩展,直至剩余截面不能再承担负载而突然断裂,从而导致结构的整体破坏.

在以往评估岸边集装箱起重机疲劳裂纹扩展寿命时,因为圆管构件均为薄壁结构,所以视初始裂纹为穿透裂纹,此时可采用二维裂纹扩展模式计算裂纹扩展行为.但研究发现,二维裂纹扩展模式并不能非常全面地反映岸边集装箱起重机薄壁圆管构件疲劳裂纹扩展行为,具有一定的局限性,并且二维裂纹扩展模式在计算时未考虑因裂纹增长对结构件裂纹扩展部位受力变化的影响,从而给计算结果带来一定误差.更为重要的是,随着岸边集装箱起重机向大型、高速、重载化等趋势发展,其结构件壁厚在逐渐增加,疲劳裂纹的三维扩展不可忽视,所以有必要对岸边集装箱起重机圆管构件未穿透裂纹的疲劳裂纹扩展进行研究.

1 疲劳裂纹扩展理论依据^[2,4]

国内外对疲劳裂纹扩展寿命预测方法的研究很

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \left(\frac{EG_{\max}}{1 - (\alpha v)^2} \right)^{1/2} - \left(\frac{EG_{\min}}{1 - (\alpha v)^2} \right)^{1/2} = \left(\frac{E}{1 - (\alpha v)^2} \right)^{1/2} (G_{\max}^{1/2} - G_{\min}^{1/2}) \quad (4)$$

式(1)可表示为

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{E}{1 - (\alpha v)^2} \right)^{m/2} (G_{\max}^{1/2} - G_{\min}^{1/2})^m \quad (5)$$

式中: E 为杨氏模量; v 为泊松比; α 为应力状态因数,在0~1之间,由试验样本平均裂纹端部的应力状态决定, $\alpha=0$ 为平面应力状态, $\alpha=1$ 为平面应变状态; G 为能量释放率,可在给定模型、材料性质及加载方式的前提下由裂纹分析软件计算得到.

2 Zencrack 软件工作机理

Zencrack 软件能够很好地模拟三维裂纹扩展行为,其应用覆盖航空航天、国防军事、能源电力、核工业、石油化工、船舶与海洋工程、工程机械、制造业、结构和土木工程等领域. Zencrack 用有限元法分析裂纹行为,与主流的有限元软件 ABAQUS, ANSYS 和 MSC Marc 有直接接口,可以充分利用有限元软件的分析能力. Zencrack 除了可以分析线弹性断裂力学外,还可以分析塑性、蠕变、超弹、大变形、接触(包括裂纹面接触)等各类非线性行为.

Zencrack 既可以用于计算静载荷作用下的断裂力学参数,也可以用于分析三维疲劳裂纹的非平面扩展行为.它提供多种选项用于定义裂纹扩展数据:灵活方便的载荷系统方法用于定义各种复杂的载荷谱;先进的三维非平面裂纹网络处理技术和裂纹扩

多,但目前在工程中应用最为广泛的依然是 1963 年由 PARIS 和 ERDOGAN 在实验基础上提出的疲劳裂纹扩展公式,即著名的 PARIS 公式.它建立了应力强度因子和裂纹扩展速率之间的关系,是当今工程应用中预测疲劳裂纹扩展寿命的理论基础.目前在对岸边集装箱起重机的裂纹扩展寿命评估时,使用的就是该公式,其形式为

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

式中: a 为裂纹长度; N 为应力循环次数; $\frac{da}{dN}$ 为裂纹扩展速率; C 和 m 为材料常数,环境因素如温度、湿度、介质和加载频率等都隐含在常数之中,可由实验数据拟合得到; ΔK 为应力强度因子范围

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (2)$$

由线弹性断裂力学可知

$$K = \left(\frac{EG}{1 - (\alpha v)^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

故式(2)可表示为

$$\Delta K = \left(\frac{EG_{\max}}{1 - (\alpha v)^2} \right)^{1/2} - \left(\frac{EG_{\min}}{1 - (\alpha v)^2} \right)^{1/2} = \left(\frac{E}{1 - (\alpha v)^2} \right)^{1/2} (G_{\max}^{1/2} - G_{\min}^{1/2}) \quad (4)$$

展分析能力,打破传统技术的局限性,不仅可以处理 I 型裂纹,而且可以处理各种混合型裂纹,可高效完成三维疲劳裂纹非平面扩展行为的模拟分析.

Zencrack 软件分析流程见图 1,将其中的框图用数字表示,以便对分析流程进行说明.

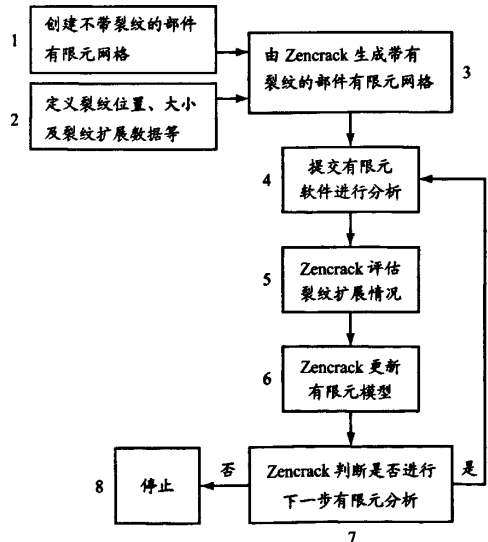


图1 Zencrack 软件分析流程

步骤1 由有限元软件(如 ABAQUS 或 ANSYS)建立分析对象的无裂纹有限元模型(框图1);

步骤2 在 Zencrack 的输入文件. zcr 文件中输入裂纹的位置、方向、大小、初始裂纹前缘、疲劳载荷及裂纹扩展法则等附加数据(框图2);

步骤3 根据步骤2中定义的初始裂纹位置和大小, Zencrack 软件调用有限元软件的输入文件, 自动生成含有裂纹的有限元模型(框图3);

步骤4 Zencrack 将含裂纹的有限元模型自动提交给有限元软件进行计算. 如果只需要得到给定裂纹的断裂力学参数(如应力强度因子、能量释放率等), 这就是最后一步(框图4);

步骤5 Zencrack 从 ABAQUS 的输出结果文件中提取必要的信息计算新的裂纹前缘位置(框图5和6);

步骤6 判断是否达到用户定义的分析结束条件(框图7), 如果没有达到, Zencrack 将提交1个新的有限元分析(返回框图4)。

上述循环过程不断重复, 直到达到用户定义的限制条件或破坏条件, 如 SIF 达到 KIC。

3 圆管构件有限元建模^[5,6]

对于岸边集装箱起重机的圆管构件, 疲劳破坏易发生在管件与插板节点的连接部位(见图2)。

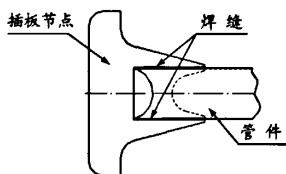


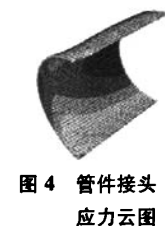
图2 管件与插板节点连接部位

由于该部位的力主要由焊缝传递, 所以其裂纹通常易发生在管接头与插板节点连接处的焊缝附近. 由于本文旨在研究未穿透裂纹与穿透裂纹的裂纹扩展关系, 以及裂纹大小、载荷幅值对未穿透裂纹扩展的影响, 所以作如下假定: 忽略端部焊缝的受力, 认为管接头部位的力全部由如图2所示的4条焊缝(每侧2条, 共4条)传递; 焊缝处承力与管件轴线方向平行, 且假定该力为恒幅脉动循环载荷; 不考虑止裂孔的影响。

以一直径为 500 mm, 壁厚为 10 mm, 接头焊缝长度为 500 mm 的圆管为研究对象, 材料为 Q345. 取弹性模量 $E = 210\ 000\ \text{MPa}$, 泊松比 $\lambda = 0.3$. 设每条焊缝承受 250 kN 轴向力。

在对圆管接头进行建模之前对该部位进行一定简化, 近似认为4条焊缝所承受的轴向力作用在接头连接部位的管壁上. 由于插板节点从圆管构件头

部中心插入, 将管件分为左右两部分. 对于焊缝所承受的轴向力, 管件左右两部分的受力具有对称性, 所以只对圆管接头的一半进行有限元建模. 固定与轴向力反向端面的 x, y, z 3 个方向自由度, 焊缝处管壁的 x 和 y 自由度, 以及另一端面的 x 和 y 自由度. 由此得到圆管接头的有限元模型见图3。



对有限元模型进行受力分析, 得应力云图见图4. 从图中可以看出, 在靠近固定端的焊缝部位应力最大, 所以为裂纹易生部位。

4 初始裂纹定义

在定义裂纹之前, 首先需要对 Zencrack 提供的裂纹块 (Crack-block) 进行说明. Zencrack 利用裂纹块将不带裂纹的有限元模型生成带有初始裂纹的有限元模型. Zencrack 提供的裂纹块包括两大类: 大裂纹块 (“Large” crack-blocks) 和标准裂纹块 (“Standard” crack-blocks). 这两大类裂纹块又细分为两类: 1/4 圆裂纹块 (Quarter circular crack-blocks) 和穿透型裂纹块 (Trough crack-blocks), 分别用于描述未穿透裂纹及穿透裂纹。

大裂纹块和标准裂纹块各有特点. 大裂纹块在裂纹扩展时能够有效控制网格的扭曲, 模拟内嵌式裂纹的扩展行为; 但是没有边界移动的功能. 标准裂纹块具有边界移动的功能, 即可以从一个网格移动到另一个网格, 但移动时会在一定程度上导致网格扭曲, 较适合模拟薄壁构件的裂纹扩展行为, 文中采用标准裂纹块分析疲劳裂纹扩展行为。

Zencrack 中对未穿透裂纹及穿透裂纹提供丰富的裂纹块. 这里采用 1/4 圆裂纹块 s02_q38 × 2 (见图5) 定义未穿透裂纹; 采用穿透型裂纹块 s02_t19 × 1 (见图6) 定义穿透裂纹。

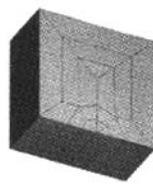
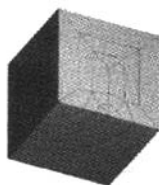


图5 裂纹块 s02_q38 × 2 图6 裂纹块 s02_t19 × 1

裂纹定义包括两部分: 裂纹位置及裂纹大小. 由图4圆管接头应力云图可知, 在靠近固定端的焊缝

部位应力最大,所以将初始裂纹定义在该处.定义未穿透裂纹大小(深度)为 2 mm,穿透裂纹长度为 5 mm.未穿透裂纹及穿透裂纹定义见图 7 和 8.

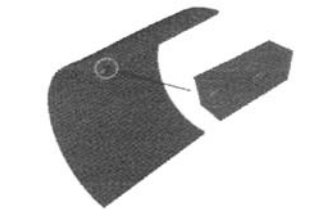


图 7 圆管接头构件未穿透初始裂纹

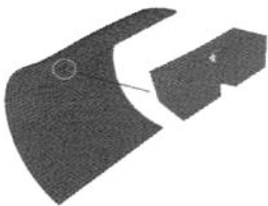


图 8 圆管接头构件穿透初始裂纹

5 管件接头疲劳裂纹扩展分析

对于初始裂纹为未穿透裂纹及穿透裂纹的圆管接头,经过裂纹扩展,其最终破坏形式相同,见图 9.



图 9 管件接头最终破坏形式

5.1 未穿透裂纹与穿透裂纹疲劳裂纹扩展分析

经计算,裂纹的 $da-dN$ 扩展曲线见图 10.图中横轴表示载荷循环数,纵轴表示裂纹扩展值.裂纹扩展数据见表 1.

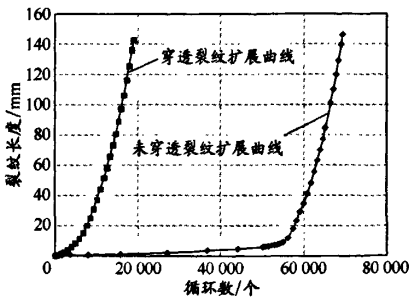


图 10 未穿透裂纹与穿透裂纹扩展曲线对比

表 1 未穿透裂纹与穿透裂纹扩展数据

类型	破坏时载荷循环总数/个
未穿透裂纹	69 498
穿透裂纹	18 868

从表 1 可见,未穿透裂纹达到破坏时载荷循环

总数比穿透裂纹达到破坏时载荷循环总数大很多,前者是后者的 3.68 倍.

将未穿透裂纹的扩展分为两部分:从初始裂纹扩展到刚好穿透整个板厚及从刚好穿透板厚扩展到疲劳破坏,见图 11.裂纹扩展数据见表 2.

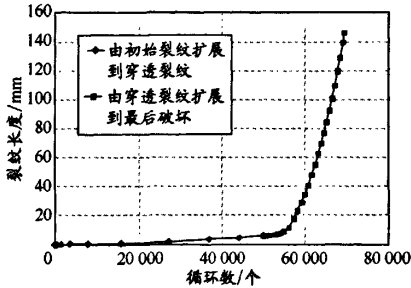


图 11 未穿透裂纹的两个扩展阶段对比

表 2 两部分裂纹扩展数据

过程	载荷循环数/个
未穿透裂纹扩展至刚好穿透	49 945
穿透裂纹扩展至破坏	19 553

从表 2 可见,未穿透裂纹扩展时,载荷循环数主要消耗在前半部分,为 49 945,占总循环数的 71.87%,表明前半部分裂纹扩展速度很慢.而后半部分的载荷循环数较小,为 19 553,占整个总循环数的 28.13%,表明后半部分裂纹扩展速度很快.

5.2 初始裂纹大小对裂纹扩展的影响

定义未穿透裂纹大小分别为 2.0 mm、2.5 mm 和 5.0 mm,讨论初始裂纹大小对裂纹扩展的影响.

经计算,3 种初始裂纹的裂纹扩展曲线见图 12,其裂纹扩展数据见表 3.

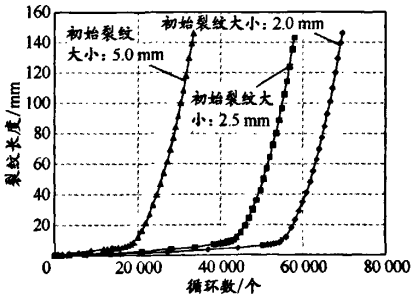


图 12 不同裂纹大小的裂纹扩展曲线

表 3 不同裂纹大小裂纹扩展数据

裂纹大小/mm	破坏时载荷循环总数/个
2.0	69 498
2.5	57 912
5.0	33 267

由图 12 及表 3 可知,未穿透裂纹达到疲劳破坏时的载荷循环总数与初始裂纹的大小关系很大.由

表 3 得图 13 可知,初始裂纹大小与裂纹扩展的载荷循环总数不成线性反比关系,初始裂纹愈小,其载荷循环数的增加愈快。

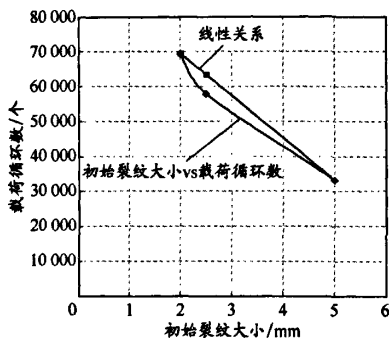


图 13 初始裂纹大小与载荷循环关系

5.2 载荷幅值对裂纹扩展的影响

设焊缝处脉动循环的载荷幅值分别为 200 kN, 250 kN, 300 kN。未穿透初始裂纹大小为 2 mm, 其余条件不变。

经计算, 3 种不同载荷幅值的裂纹扩展曲线见图 14, 其裂纹扩展数据见表 4。

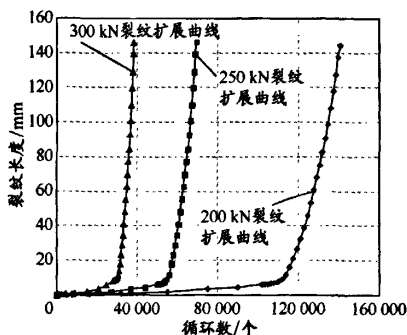


图 14 3 种载荷幅值下的裂纹扩展曲线

表 4 不同载荷幅值的裂纹扩展数据

载荷幅值/kN	破坏时载荷循环总数/个
200	140 556
250	69 498
300	38 417

由表 4 得图 15, 可见载荷幅值大小与裂纹扩展载荷循环数不成线性反比关系。载荷幅值愈小, 其裂纹扩展载荷循环数增加愈快。

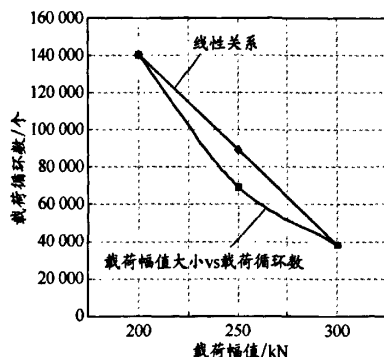


图 15 载荷幅值与载荷循环关系

6 结 论

利用 Zencrack 软件对岸边集装箱起重机圆管构件进行裂纹扩展分析, 深入研究未穿透裂纹与穿透裂纹的裂纹扩展关系, 以及裂纹大小、载荷幅值等对疲劳裂纹扩展寿命的影响, 得出如下结论:

(1) 未穿透裂纹的扩展载荷循环数即裂纹扩展寿命要比穿透裂纹的扩展寿命大得多, 原因在于裂纹由未穿透扩展到穿透裂纹这一过程占整个裂纹扩展寿命的绝大部分。

(2) 初始裂纹大小对疲劳裂纹扩展寿命的影响很大。对于未穿透裂纹, 裂纹大小与裂纹扩展寿命不成线性反比关系。初始裂纹愈小, 其载荷循环数愈大, 即裂纹扩展寿命越大。所以岸边集装箱起重机投入生产后, 对未穿透裂纹的及早和及时发现, 能够更加有效地预防岸边集装箱起重机结构件疲劳破坏事件的发生。

(3) 在初始裂纹大小一定的前提下, 岸边集装箱起重机结构件受力大小对其疲劳裂纹扩展寿命影响很大。所以, 设计岸边集装箱起重机应优化结构设计、降低结构件受力, 以保证其有足够的疲劳寿命。

参考文献:

- [1] 蒋国仁. 岸边集装箱起重机[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2001: 114-130.
- [2] 张行. 断裂与损伤力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 511-544.
- [3] BILLARDON R, ADAM C, LEMAITRE J. Study of the non-uniform growth of a plane crack in a three-dimensional body subjected to non-proportional loading[J]. Int J Solids Structures, 1986, 22(7): 677-693.
- [4] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 75-86.
- [5] 巴斯 K J. 工程分析中的有限元法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991: 108-115.
- [6] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 65-98.